



André Filipe Neves Cardoso

Licenciado em Ciências da Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Equipamento para ensaios impulsivos no Laboratório de Alta Tensão do DEE-FCT/UNL

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Orientador: Prof. Doutor Mário Ventim Neves,
Prof. Auxiliar, Universidade Nova de Lisboa

Júri

Presidente: Name of the male committee chairperson

Arguentes: Name of a female rapporteur

Name of another (male) rapporteur

Vogais: Another member of the committee

Yet another member of the committee



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro, 2017

Equipamento para ensaios impulsivos no Laboratório de Alta Tensão do DEE-FCT/UNL

Copyright © André Filipe Neves Cardoso, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

À Tânia, pais e irmãos

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Doutor Mário Ventim Neves a oportunidade de desenvolver este tema de dissertação, e toda a ajuda e partilha de conhecimento que foram fundamentais para a realização deste trabalho.

Ao Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da Faculdade de Ciências e Engenharia da Universidade Nova de Lisboa e em especial ao seu corpo docente por todo o conhecimento transmitido ao longo do curso e à disponibilidade que sempre demonstraram, o meu obrigado. Agradeço ainda a todos os meus colegas de curso e amigos que foram fundamentais para a conclusão desta etapa, em especial ao Diogo Correia, João Carvalho, Dário Pedro, Diogo Ferreira, Cláudio Pereira e António Pereira, pela paciência, pelos conselhos, pela entajada e pelas risadas que estiveram sempre presentes.

Aos meus pais, irmãos, avós, tios e futuros sogros pelo apoio incondicional e pela educação e princípios que me transmitiram ao longo da vida e que me permitiram alcançar mais um objetivo no meu percurso académico, agradeço profundamente.

Por último, gostava de agradecer à minha namorada, Tânia, por acreditar sempre em mim e não permitir que houvesse desmotivação da minha parte. Foi um pilar e o meu maior apoio nestes anos de muito esforço e trabalho.

Todos contribuíram, de uma maneira ou de outra, para o sucesso deste trabalho, e por isso agradeço-vos, do fundo do coração.

RESUMO

As linhas de transporte e distribuição de energia são expostas regularmente a sobretensões causadas por descargas atmosféricas, na forma direta ou indireta. O efeito das descargas atmosféricas indiretas, que não atingem diretamente as linhas elétricas, pode igualmente ser sentido pelas mesmas, ainda que as descargas ocorram a vários quilómetros.

As descargas atmosféricas, ao atingirem as linhas elétricas, podem levar à ocorrência de uma disrupção nos isoladores presentes nas estruturas de suporte ligadas à terra, caso a tensão aos seus terminais seja superior à tensão suportável. Este curto-circuito provoca a saída de serviço da linha atingida e consequentemente afeta o fornecimento de energia elétrica.

Nesta dissertação pretende-se criar um circuito capaz de reproduzir descargas atmosféricas para poder ensaiar uma cadeia de isoladores e verificar se estes apresentam algum defeito e qual a sua tensão suportável. Ao circuito de geração das ondas padrão que simulam descargas atmosféricas junta-se o circuito de medição e o objeto a ensaiar. Com estes dados, é possível definir se os isoladores suportam as tensões a que podem estar sujeitos e se não ocorreu nenhuma perfuração dos mesmos. Ao ensaiar os isoladores é também possível obter a sua característica de isolamento e com isso saber qual terá de ser a curva dos equipamentos de proteção, de modo a proteger os equipamentos. Estes ensaios denominam-se ensaios ao choque atmosférico ou ensaios impulsivos. O circuito e os ensaios são efetuados no laboratório de alta tensão do Departamento de Engenharia Electrotécnica (DEE) da Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT)/Universidade Nova de Lisboa (UNL).

Palavras-chave: Alta tensão, linhas elétricas, isoladores, descargas atmosféricas, ensaios ao choque atmosférico, ensaios impulsivos.

ABSTRACT

The distribution and transmission lines are exposed regularly to overvoltages caused by either direct or indirect lightning strikes. The impact of indirect lightning strikes, which do not hit the power lines directly, can equally be felt by them, even though the discharge occurred several kilometres away.

When the lightning strikes hit the power lines, they can lead to a breakdown of the insulators that belong to the grounded support structures if the voltage at its terminals is higher than the withstand voltage. This short-circuit can damage the stricken line and make it unavailable, and as a result, it affects the electric power supply.

This dissertation aims to create a circuit capable of reproducing lightning strikes in order to test the chain of insulators and check if they have any fault and what their withstand voltage is. The standard wave generation circuit that simulate lightning strikes joins the measuring circuit and the object to be tested. With this data, it is possible to define whether the insulators withstand the voltages that they may be subjected to and if there has been no perforation of the same insulators. To test the insulators is also possible to get their insulation level and know what has to be the curve of protective equipment, in order to protect the equipment. These tests are named impulse voltage tests. The whole circuit and the tests are performed in a high voltage laboratory, situated in the Department of Electrical Engineering (DEE) of FCT/UNL.

Keywords: High voltage, power lines, insulators, lightning strikes, lightning impulse tests, impulse tests.

ÍNDICE

Lista de Figuras	xv
Lista de Tabelas	xvii
Siglas	xix
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento, Motivação e Objectivos	1
1.2 Estrutura da Dissertação	2
1.3 Principais Contribuições da Dissertação	3
2 Trabalho Relacionado	5
2.1 Geração e Medição de Tensões de Impulso	5
2.1.1 Características das Tensões de Impulso	5
2.1.2 Geração de Tensões de Impulso	7
2.1.3 Medição de Tensões de Impulso	13
2.2 Digitalizadores em Ensaaios Impulsivos	17
2.2.1 Digitalizador RTD 710A	18
2.2.2 Outros Digitalizadores no Mercado	19
3 Arquitetura e Implementação do Sistema de Ensaio	21
3.1 Descrição Geral e Normas de Segurança	22
3.2 Alimentação da Montagem	23
3.3 Equipamento Usado	24
3.4 Montagem do Circuito de Ensaio	26
3.5 Cadeia de Isoladores	28
4 Digitalizador RTD710A	33
4.1 Comunicação <i>General Purpose Interface Bus</i> (GPIB)- <i>Universal Serial Bus</i> (USB)	34
4.2 Comandos GPIB	36
4.3 Interface com o Utilizador	42
5 Ensaios e Resultados Experimentais	51
5.1 Tensões de Impulso <i>Standard</i>	51

ÍNDICE

5.2	Determinação da Tensão de Contornamento U_{50} de uma Cadeia de Isoladores	59
5.3	Determinação da Curva “tensão – tempo” do Isolador	64
6	Conclusões e Trabalho Futuro	69
	Bibliografia	73

LISTA DE FIGURAS

2.1	Tensão de impulso atmosférico	6
2.2	Tensão de impulso de manobra	7
2.3	Circuitos de geração de impulsos de um único nível	8
2.4	Circuito de geração de impulsos - grandezas em notação simbólica	9
2.5	Forma de onda de dupla exponencial	10
2.6	Sistema básico para ensaios de alta tensão	14
2.7	Função de distribuição da tensão disruptiva de elétrodos esféricos	15
2.8	Determinação do intervalo de disrupção	16
2.9	Característica tensão-tempo	17
3.1	Esquema de alimentação da montagem	24
3.2	Diagrama de configuração da medição de tensões de impulso	26
3.3	Diagrama de configuração da medição de tensões de impulso (continuação)	26
3.4	Cadeia composta por três isoladores de vidro temperado	28
3.5	Designação do isolador presente no seu capacete	29
3.6	Pino de suporte, pino de segurança, varão e capacete de sustentação da linha	29
3.7	Circuito de geração e medição de tensões de impulso, em laboratório	30
3.8	Mesa de controlo com equipamentos de geração e medição	31
4.1	Comutador de parâmetros GPIB e interface de conexão <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> (IEEE) 488.2, respetivamente	34
4.2	<i>Measurement & Automation Explorer</i> - Conexão com o digitalizador RTD710A	36
4.3	<i>VISA Test Panel</i>	37
4.4	Configuração do modo de entrada do canal 1	38
4.5	<i>Query</i> do comando 'VMode'	38
4.6	Configuração do canal 1	39
4.7	<i>Query</i> do comando 'CH1'	39
4.8	Configuração do registo de dados	40
4.9	<i>Query</i> do comando 'Record'	40
4.10	Configuração dos dados	41
4.11	<i>Query</i> do comando 'Data'	41
4.12	<i>Query</i> do comando 'Set'	42
4.13	Janela de interface para inicialização do instrumento	43

4.14	Janela de interface para comunicação avançada com o instrumento	43
4.15	Janela de interface para configuração do modo vertical	44
4.16	Janela de interface para configuração do modo de aquisição dos dados	46
4.17	Janela de interface para configuração do modo de disparo	48
4.18	Janela de interface para visualização das formas de onda	49
4.19	Forma de onda resultante da aplicação de uma senoide ao digitalizador . . .	50
5.1	Características da onda de tensão de um impulso atmosférico	52
5.2	Onda de tensão de um impulso atmosférico obtida experimentalmente . . .	52
5.3	Obtenção dos parâmetros temporais T_{30} e T_{90} da tensão de impulso atmosférico	53
5.4	Obtenção do tempo virtual de cauda da tensão de impulso atmosférico . . .	55
5.5	Onda de tensão de um impulso atmosférico obtida experimentalmente . . .	56
5.6	Obtenção dos parâmetros temporais T_{30} e T_{90} , com a inclusão de um condensador em paralelo com o circuito	56
5.7	Obtenção do tempo virtual de cauda, com a inclusão de um condensador em paralelo com o circuito	58
5.8	Efeito do contornamento do isolador	63
5.9	Efeito do contornamento do isolador em extremidades opostas	63
5.10	Aplicação de uma onda de choque com 137,6 kV	65
5.11	Aplicação de uma onda de choque com 154,3 kV	65
5.12	Coordenação entre os níveis básicos de isolamento e de proteção	67
5.13	Coordenação do isolamento	67

LISTA DE TABELAS

2.1	Resultados de algumas formas de onda	13
3.1	Componentes básicos da configuração de ensaio com tensões de impulso . .	25
4.1	Seleção do tamanho do registo	45
5.1	Determinação da tensão de contornamento U_{50} pelo método <i>Up and Down</i> .	61
5.2	Parâmetros relativos aos dois ensaios realizados para determinação da curva tensão-tempo	66

SIGLAS

AC	Corrente Alternada.
AT	Alta Tensão.
BNC	Bayonet Nut Coupling.
BT	Baixa Tensão.
CRLF	<i>Carriage Return Line Feed.</i>
DC	Corrente Contínua.
DEE	Departamento de Engenharia Electrotécnica.
EDP	Energias de Portugal.
EOI	<i>End Or Identify.</i>
ERSE	Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos.
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologia.
GPIB	<i>General Purpose Interface Bus.</i>
HS	<i>High Speed.</i>
HV	<i>High Voltage.</i>

SIGLAS

IEEE *Institute of Electrical and Electronics Engineers.*

IEV *International Electrotechnical Vocabulary.*

LED *Light Emitting Diode.*

LF *Line Feed.*

MAX *Measurement & Automation Explorer.*

NI *National Instruments.*

RC *Resistência-Condensador.*

SEN *Sistema Elétrico Nacional.*

SRQ *Service Request.*

UNL *Universidade Nova de Lisboa.*

USB *Universal Serial Bus.*

VISA *Virtual Instrument Software Architecture.*

NOMENCLATURA

Δt	Intervalo de tempo correspondente à diferença entre os instantes T_{30} e T_{90}
η	Eficiência da tensão
$\frac{1}{\alpha_1}, \frac{1}{\alpha_2}$	Constantes de tempo
\hat{U}	Valor máximo de tensão
\hat{U}_d	Valor máximo da tensão de disrupção
\hat{U}_{d_0}	Valor máximo da tensão de disrupção, em condições <i>standard</i>
Ω	Ohm
d	Densidade relativa do ar
T_1	Tempo virtual da frente de onda respeitante à tensão de impulso atmosférico
T_2	Tempo virtual da cauda de onda respeitante à tensão de impulso atmosférico
T_h	Tempo virtual da cauda de onda respeitante à tensão de impulso de manobra
T_p	Tempo virtual da frente de onda respeitante à tensão de impulso de manobra
t_v	Intervalo de disrupção
T_{30}	Instante de tempo em que a tensão de impulso corresponde a 30 % do seu valor de pico
T_{90}	Instante de tempo em que a tensão de impulso corresponde a 90 % do seu valor de pico
$u(t)$	Tensão de saída no domínio do tempo
U_{50}	Valor de pico da tensão de choque que provoca o contornamento 50 % das vezes
C	Capacidade
F	Farad
Hz	Hertz

SIGLAS

kVA	Quilovoltampere (10^3 VA)
R	Resistência
s	Segundos
t	Tempo
V	Volt
W	Energia máxima armazenada
Z	Impedância
μ s	Microssegundos

INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento, Motivação e Objectivos

De acordo com a Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos (ERSE), "constitui objetivo fundamental das atividades que integram o Sistema Elétrico Nacional (SEN) a disponibilização de energia elétrica em termos adequados às necessidades dos consumidores, quer qualitativa quer quantitativamente, a concretizar com base em princípios de racionalidade e eficiência dos meios a utilizar em todas as atividades que integram o setor elétrico desde a produção de eletricidade até ao seu fornecimento ao consumidor final".

A energia elétrica, sendo um bem essencial, está, segundo a ERSE, "sujeita a obrigações de serviço público, da responsabilidade de todos os intervenientes do setor elétrico", das quais se destacam, entre outras, a segurança, a regularidade e a qualidade do seu abastecimento.

Dado o aumento da procura de energia elétrica, a rede de geração, transporte e distribuição de energia tem de ser cada vez mais confiável, para que os consumidores não sejam prejudicados com a ocorrência de defeitos nas redes de energia que possam afetar o seu fornecimento.

A tensão normal de serviço não esforça intensamente o isolamento do sistema de energia. Os esforços a que o sistema está sujeito surgem de sobretensões, que podem ser de origem interna ou externa, segundo [1]. As sobretensões de origem externa estão associadas às descargas atmosféricas e não dependem da tensão do sistema. As sobretensões de origem interna são produzidas por mudanças nas condições de funcionamento normais do sistema, tais como operações de comutação, uma falha no sistema ou flutuações na geração ou nas cargas, de acordo com [1].

As descargas atmosféricas que atingem as linhas de transmissão provocam um aumento brusco das tensões na linha e estabelecem ondas viajantes (*travelling waves*) ao longo da linha que podem danificar o isolamento do sistema. A magnitude destas sobretensões pode atingir alguns milhares de quilovolts, segundo [1]. Os equipamentos presentes nos sistemas de energia têm de suportar não só a tensão estipulada, correspondente à tensão máxima desse sistema, mas também sobretensões, segundo [1]. Então, é necessário ensaiar os equipamentos de Alta Tensão (AT) durante a sua construção e antes do comissionamento.

Para estudar os efeitos das descargas atmosféricas, foram realizados ensaios a um isolador para analisar o seu comportamento quando a linha de transmissão onde o mesmo está inserido é exposta a este tipo de sobretensões. Assim sendo, o objetivo deste trabalho engloba o estudo do funcionamento do circuito gerador de impulsos, o fenómeno transitório (descarga atmosférica) que pode originar problemas no funcionamento de equipamentos elétricos e possibilitar a execução de ensaios ao choque atmosférico. Estes ensaios servem para verificação da suportabilidade dos elementos do sistema de geração, transporte e distribuição de energia, neste caso de um isolador, através da aplicação de tensões de impulsos atmosféricos.

Os ensaios realizados, primeiramente foram feitos sem o isolador ligado ao circuito, para analisar a forma das ondas geradas e perceber se estavam de acordo com as normas para os ensaios ao choque atmosférico. Estas ondas geradas caracterizam-se por ter uma frente de onda muito curta, desde uma fração de microssegundo até poucas dezenas de microssegundos, descendo posteriormente até zero de forma lenta, tal como acontece com as sobretensões atmosféricas. De seguida, foi determinada a tensão de contornamento do isolador em estudo através da aplicação de sucessivos impulsos, registando o seu comportamento. Por último, foram feitos ensaios com o intuito de determinar a curva tensão-tempo do isolador.

1.2 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos, sendo que cada um deles trata de uma parte do trabalho desenvolvido, a começar pela introdução (onde se encontra o presente texto) e a finalizar nas conclusões e sugestões para trabalho futuro. A estrutura dos capítulos e uma breve descrição dos mesmos é apresentada de seguida.

- **Capítulo 1: Introdução** — engloba o enquadramento, os objetivos da dissertação e qual foi a motivação para a escolha desta temática, bem como as principais contribuições da mesma.
- **Capítulo 2: Trabalho Relacionado** — aborda os conceitos chave para a compreensão do trabalho desenvolvido, tais como as características das tensões de impulso, a

geração e medição de tensões de impulso e os digitalizadores usados nos ensaios impulsivos.

- **Capítulo 3: Arquitetura e Implementação do Sistema de Ensaio** — apresenta uma descrição geral do sistema, as normas de segurança, a alimentação da montagem, o equipamento usado, a montagem do circuito de ensaio no laboratório, as características da cadeia de isoladores e o modo como esta se interliga com o resto do circuito.
- **Capítulo 4: Digitalizador RTD710A** — mostra a comunicação feita com o instrumento através de exemplos práticos e a interface que permite ao utilizador, de forma mais intuitiva, controlá-lo.
- **Capítulo 5: Simulações e Resultados Experimentais** — exhibe os resultados obtidos pela utilização exclusiva do sistema de ensaio e pela sua utilização em conjunto com a cadeia de isoladores. Verifica-se ainda o correto funcionamento da cadeia ensaiada e são tiradas as devidas ilações.
- **Capítulo 6: Conclusões e Trabalho Futuro** — expõe as principais conclusões retiradas da realização do presente trabalho, bem como sugestões para o melhorar.

1.3 Principais Contribuições da Dissertação

O grande objetivo deste trabalho é possibilitar a execução dos ensaios mencionados no laboratório de alta tensão do DEE - FCT/UNL. O equipamento resultante deste trabalho passará a fazer parte do laboratório e a ser usado nas aulas de AT. Nunca antes tinham sido feitos ensaios impulsivos no laboratório, pelo que a realização deste trabalho vem permitir que pela primeira vez estes ensaios sejam realizados no laboratório de alta tensão. É esta a grande contribuição desta dissertação, proporcionar uma aprendizagem sobre ensaios em alta tensão a todos os alunos interessados nesta área, de uma forma mais prática. Com o circuito montado, os alunos interessados podem aprimorar os seus conhecimentos de alta tensão, obtido nas aulas teóricas, ao mesmo tempo que ensaiam equipamentos de forma análoga ao que as grandes empresas fazem a nível industrial, ainda que num contexto laboratorial e de menor dimensão. Ou seja, a montagem efetuada irá permitir uma maior e mais próxima interação com os alunos, ao mesmo tempo que os motiva a estudar estas matérias, tendo como base este projeto.

O equipamento construído de raiz para esta dissertação e montado no laboratório pode ainda servir como base para a execução de futuros ensaios que apliquem princípios semelhantes aos ensaios realizados neste projeto e onde os objetos a ensaiar sejam de materiais ou de natureza diferente.

O ensino em AT sai assim valorizado, uma vez que o ensino teórico é complementado com uma forte componente prática, ao nível do que é feito na indústria, ainda que num contexto laboratorial, como já foi referido.

TRABALHO RELACIONADO

2.1 Geração e Medição de Tensões de Impulso

As perturbações dos sistemas de transmissão e distribuição de energia eléctrica são normalmente causadas por dois tipos de sobretensões cujas amplitudes podem exceder bastante os valores máximos da tensão de serviço em Corrente Alternada (AC). De modo a simular as tensões derivadas de perturbações internas e externas e o fenómeno da disrupção, é necessário o estudo destes impulsos através de ensaios em AT [1].

Normalmente, os impulsos em AT são gerados pela descarga de condensadores, através de disjuntores, para uma rede interligada de resistências e condensadores (circuitos Resistência-Condensador (RC)). O valor máximo das tensões impulsivas pode ser determinado com o auxílio de um disjuntor, que consiste num dispositivo com dois eléctrodos nas extremidades separados por um intervalo de ar, entre os quais é iniciada a descarga eléctrica, conforme as condições especificadas (IEV 151-13-33). Outra alternativa é a medição das tensões de impulso através de circuitos eletrónicos combinados com divisores de tensão, segundo [2]. No entanto, os principais dispositivos de medição são o osciloscópio e os digitalizadores (expostos no capítulo 2.2), de acordo com [2]. Estes últimos permitem obter a característica completa das ondas de tensão aplicadas, por meio de divisores de tensão [2].

2.1.1 Características das Tensões de Impulso

O primeiro tipo de impulsos deriva das sobretensões atmosféricas, originadas pelos raios que atingem a superfície terrestre. As tensões de impulsos atmosféricos¹ correspondem

¹Conhecidas como *lightning impulse voltages*, são as tensões geradas em laboratório para simular o fenómeno das sobretensões atmosféricas.

a tensões de impulso com uma forma específica aplicadas durante os ensaios dielétricos (*International Electrotechnical Vocabulary* (IEV) 614-03-28). Estes ensaios são também designados ensaios ao choque, ou seja, ensaios onde são aplicadas tensões com uma determinada polaridade, amplitude e forma de onda a equipamentos isolados. Geralmente a duração da frente de onda deste tipo de tensões é cerca de $1\text{ }\mu\text{s}$, que corresponde ao tempo necessário para atingir o valor máximo de tensão \hat{U} [2]. A duração de meia amplitude, que é o intervalo de tempo entre a origem da tensão de impulso e o instante na cauda em que a tensão decresce até metade do valor máximo, corresponde a cerca de $50\text{ }\mu\text{s}$ (IEV 614-03-32). A Figura 2.1, adaptada de [2], mostra a representação de uma onda de tensão de impulso atmosférico padronizada.

A frente de onda da tensão de impulso atmosférico representada na Figura 2.1 é difícil de caracterizar devido à sua verdadeira forma, então introduz-se uma linha recta 0_1-S_1 que passa pelos pontos A e B² (mostrados na Figura 2.1), de forma a ser possível caracterizar a frente de onda, segundo [2]. Sendo assim é possível determinar o tempo virtual T_1 respectivo à frente de onda e o tempo virtual T_2 respectivo ao tempo decorrido entre a origem 0_1 e o ponto C (meia amplitude da onda de tensão).

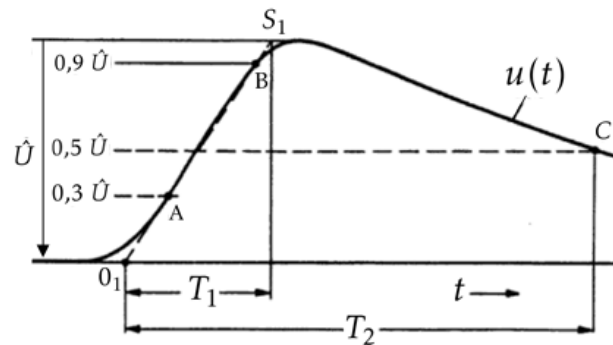


Figura 2.1: Tensão de impulso atmosférico

As ondas de tensão de impulsos atmosféricos aceites como padrão nos ensaios em AT têm a forma 1,2/50, correspondente a tensões impulsivas com os seguintes parâmetros virtuais, segundo [1]:

$$\begin{cases} T_1 = 1,2\text{ }\mu\text{s} \pm 30\% \\ T_2 = 50\text{ }\mu\text{s} \pm 20\% \end{cases}$$

O segundo tipo de impulsos é consequência das sobretensões provenientes das operações de manobra nas redes AT. As tensões de impulsos de manobra³ correspondem a tensões de impulso com uma forma específica aplicadas durante os ensaios dielétricos,

²Instantes de tempo em que a tensão de impulso corresponde a 30 % e 90 % do seu valor de pico, respetivamente

³Conhecidas como *switching impulse voltages*, são as tensões geradas em laboratório para simular o fenómeno das sobretensões resultantes de operações de manobra nas redes AT.

com uma duração até ao pico entre 100 μ s e 300 μ s, e com uma duração de meia amplitude de poucos milissegundos (IEV 614-03-30). Este tipo de impulsos tem aproximadamente a mesma forma de onda dos impulsos atmosféricos, no entanto, a onda de tensão dos impulsos de manobra dura consideravelmente mais, ou seja, são impulsos mais lentos [2]. A Figura 2.2, adaptada de [2], mostra a representação da onda de tensão de um impulso de manobra padronizado.

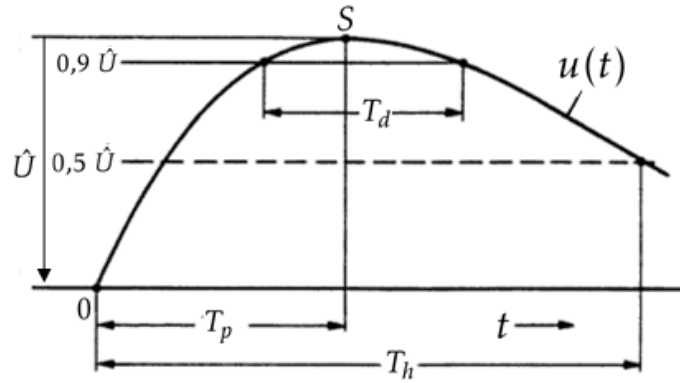


Figura 2.2: Tensão de impulso de manobra

O registo destes impulsos mais longos não apresenta as mesmas dificuldades que o outro tipo de impulsos. Sendo assim, podem-se definir valores *standard* para a verdadeira origem 0 e o pico da onda S. A diferença entre a duração dos dois tipos impulsos é mais perceptível ao destacar a escala de tempo. Os valores dos parâmetros respectivos à tensão dos impulsos de manobra padronizados são [1]:

$$\begin{cases} T_p = 250 \mu s \pm 20\% \\ T_h = 2500 \mu s \pm 60\% \end{cases}$$

Como referido anteriormente, os impulsos de manobra aceites como padrão nos ensaios são os impulsos com a forma 250/2500, sendo que T_p é o tempo da frente de onda, respectivo à duração entre a origem do referencial 0 e o máximo valor atingido S e T_h é o tempo de meia amplitude da onda de tensão, que corresponde à duração entre a origem 0 e o instante na cauda em que a tensão decresce até metade do valor máximo ($0,5 \hat{U}$) [1].

2.1.2 Geração de Tensões de Impulso

Na Figura 2.3, adaptada de [1], estão representados dois circuitos básicos muito utilizados para a geração de tensões de impulso.

O princípio básico deste circuito é apresentado de seguida.

A capacidade C_1 é carregada gradualmente através de uma fonte de Corrente Contínua (DC) até que ocorra disrupção no disruptor G. Este disruptor atua como um limitador de tensão, em que o tempo de escorvamento é bastante inferior em comparação com T_1 [1].

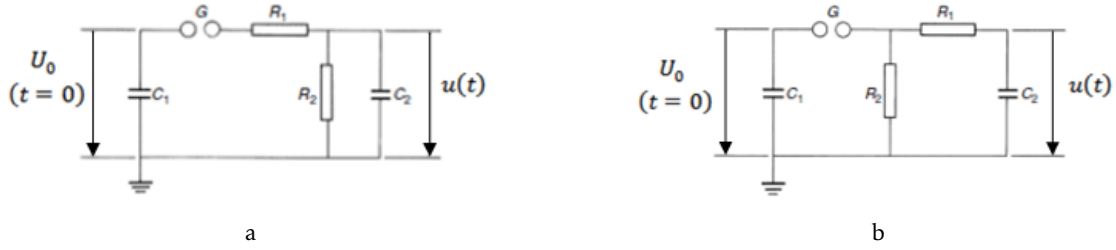


Figura 2.3: Circuitos de geração de impulsos de um único nível

As resistências R_1 , R_2 e o condensador C_2 são responsáveis por dar forma às ondas. R_1 tem como objectivo amortecer a onda resultante e controlar o tempo de frente T_1 . R_2 vai descarregar o condensador C_1 e controlar o tempo de cauda T_2 . Por último, a capacidade C_2 representa a carga máxima, ou seja, o objecto a ensaiar e todas as outras capacidades em paralelo com o objecto em ensaio, tais como equipamentos de medição [1].

A diferença mais visível entre o circuito a (Figura 2.3a) e o circuito b (Figura 2.3b) é a posição da resistência R_2 . No primeiro caso, a resistência de descarga R_2 está ligada depois da resistência de amortecimento R_1 , enquanto que no segundo caso R_2 está ligada antes de R_1 . As consequências desta diferença entre os circuitos serão expostas posteriormente.

Os valores dos elementos constituintes dos circuitos determinam a forma da curva da tensão de impulso. O curto espaço de tempo da frente de onda exige um carregamento rápido de C_2 até ao valor máximo \hat{U} , enquanto que a duração mais longa da cauda de onda exige um descarregamento demorado. Isto é conseguido através da relação $R_2 \gg R_1$ [2]. Um dos parâmetros mais importantes nos geradores de tensões impulsivas é a energia máxima armazenada [2], dada por:

$$W = \frac{1}{2} C_1 (U_{0_{max}})^2 \quad (2.1)$$

Como $C_1 \gg C_2$, a equação 2.1 determina o custo do gerador [1]. Para a análise dos circuitos a e b usou-se o conceito de transformada de Laplace, que simula as condições fronteira, em que, segundo [1]:

- Para $t \leq 0$, C_1 é carregado com U_0 ;
- Para $t > 0$, C_1 é ligado directamente à rede de enformação da onda.

O circuito representado na Figura 2.4, adaptada de [1], mostra o circuito resultante da transformação das suas variáveis para o domínio s , em que dependendo do circuito a analisar (a ou b), R_2 encontra-se à direita ou à esquerda de R_1 .

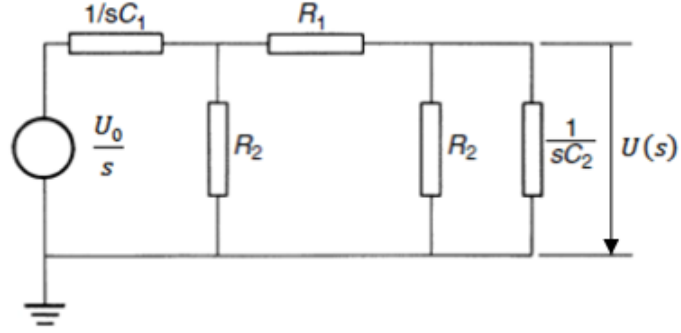


Figura 2.4: Circuito de geração de impulsos - grandezas em notação simbólica

Para o circuito da Figura 2.3a a tensão de saída é dada, em notação simbólica, por:

$$U(s) = \frac{U_0}{s} \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (2.2)$$

Onde

$$Z_1 = \frac{1}{sC_1} + R_1;$$

$$Z_2 = R_2 \parallel \frac{1}{sC_2} = \frac{R_2}{1+sC_2R_2}.$$

Por substituição, tem-se, segundo [1]:

$$U(s) = \frac{U_0}{k} \frac{1}{s^2 + as + b} \quad (2.3)$$

Onde

$$a = \left(\frac{1}{R_1C_1} + \frac{1}{R_1C_2} + \frac{1}{R_2C_2} \right);$$

$$b = \left(\frac{1}{R_1R_2C_1C_2} \right); \quad (2.4)$$

$$k = R_1C_2.$$

Para o circuito da Figura 2.3b a expressão da tensão de saída $U(s)$ é igual à calculada para o circuito a (equação 2.3), apenas diferindo na constante a [1]. Neste caso,

$$a = \left(\frac{1}{R_1C_1} + \frac{1}{R_1C_2} + \frac{1}{R_2C_1} \right);$$

$$b = \left(\frac{1}{R_1R_2C_1C_2} \right); \quad (2.5)$$

$$k = R_1C_2.$$

No entanto, ambos os circuitos apresentam a mesma expressão $u(t)$, no domínio do tempo, calculada a partir das tabelas de Transformadas de Laplace [1]:

$$u(t) = \frac{U_0}{k} \frac{1}{(\alpha_2 - \alpha_1)} (e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t}) \quad (2.6)$$

Onde α_1 e α_2 são raízes da equação $s^2 + as + b = 0$, ou seja, segundo [1]:

$$\alpha_1, \alpha_2 = \frac{a}{2} \mp \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 - b} \quad (2.7)$$

Assim sendo, a tensão de saída $u(t)$ é dada pela sobreposição de duas funções exponenciais (*double exponential impulse voltages*), com sinais diferentes, segundo [1]. De acordo com a equação 2.7 e segundo [1], a raiz negativa resulta numa constante de tempo maior ($1/\alpha_1$) do que a raiz positiva, que corresponde a $1/\alpha_2$. A Figura 2.5, adaptada de [1], mostra um esboço da curva resultante, sendo \hat{U} o valor máximo de tensão.

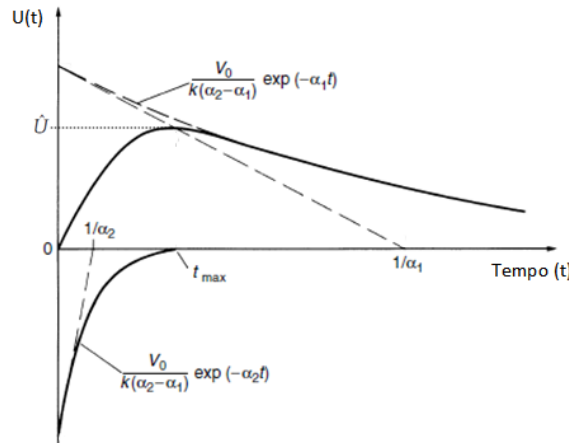


Figura 2.5: Forma de onda de dupla exponencial

Este tipo de impulso mostrado na Figura 2.5 atinge rapidamente o seu máximo, \hat{U} , descendo posteriormente até zero de forma muito menos abrupta, não apresentando oscilações. Se ocorrer uma disrupção intencional ou não intencional num circuito de AT durante um impulso, devido ao colapso repentino da tensão, a onda resultante é denominada onda de tensão de impulso cortada (*chopped impulse voltage*) (IEV 614-03-34), segundo [2]. O corte pode ocorrer na frente da onda (durante a subida de tensão), no pico da onda ou na cauda da onda de tensão.

Uma grande diferença entre os dois circuitos de geração da tensão de impulso surge aquando do cálculo da eficiência η , definida como a relação entre o valor máximo da tensão de saída, \hat{U} , e a tensão aplicada, U_0 [1].

$$\eta = \frac{\hat{U}}{U_0} \quad (2.8)$$

A eficiência pode ser calculada através do tempo que a tensão de saída $u(t)$ demora a atingir o seu valor máximo, ou seja, descobrindo t_{max} para o qual $du(t)/dt = 0$. Segundo [1], vem:

$$t_{max} = \frac{\ln(\alpha_2/\alpha_1)}{(\alpha_2 - \alpha_1)} \quad (2.9)$$

Substituindo a equação 2.9 na equação 2.6, vem que:

$$\eta = \frac{(\alpha_2/\alpha_1)^{-[\alpha_1/(\alpha_2-\alpha_1)]} - (\alpha_2/\alpha_1)^{-[\alpha_2/(\alpha_2-\alpha_1)]}}{k(\alpha_2 - \alpha_1)} \quad (2.10)$$

Para uma determinada forma T_1/T_2 ou T_p/T_h das tensões de impulso, os valores α_1 e α_2 devem ser iguais para ambos os circuitos, de acordo com [1]. Sendo assim, as diferenças entre os dois circuitos relativamente à eficiência η devem-se apenas a diferenças no valor $k = R_1 C_2$. Primeiramente, calculou-se este parâmetro k para o circuito da Figura 2.3b, que tem sempre a maior eficiência para uma certa relação C_2/C_1 , visto que durante a descarga as resistências R_1 e R_2 não formam um divisor de tensão, tal como acontece com o circuito da Figura 2.3a [1]. O produto $R_1 C_2$ é determinado através da equação 2.7, fazendo as seguintes igualdades:

$$\begin{aligned} \alpha_1 \alpha_2 &= \left(\frac{a}{2} - \sqrt{\left(\frac{a}{2} \right)^2 - b} \right) \left(\frac{a}{2} + \sqrt{\left(\frac{a}{2} \right)^2 - b} \right) = b; \\ \alpha_1 + \alpha_2 &= a. \end{aligned} \quad (2.11)$$

Por substituição de a e b na equação 2.6, resulta:

$$k = R_1 C_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{\alpha_1 \alpha_2} \right) \left[1 - 4 \frac{\alpha_1 \alpha_2}{(\alpha_1 + \alpha_2)^2} \left(1 + \frac{C_2}{C_1} \right) \right] \quad (2.12)$$

Considerando $C_1 \geq C_2$, que é cumprido em termos práticos nos circuitos de geração, e $\alpha_2 \gg \alpha_1$ para todas as formas de onda normalizadas, a equação 2.12 pode ser simplificada, obtendo-se, segundo [1]:

$$k \cong \frac{1 + C_2/C_1}{(\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (2.13)$$

Finalmente, substituindo esta expressão na equação 2.10 e considerando novamente $\alpha_2 \gg \alpha_1$, resulta, segundo [1]:

$$\eta \cong \frac{1}{1 + (C_2/C_1)} \quad (2.14)$$

Analisando a equação 2.14, verifica-se que a eficiência da tensão para este circuito vai aumentar continuamente se a relação (C_2/C_1) diminuir para zero. Isto explica a razão por que a capacidade C_1 deve ser muito maior que a carga C_2 .

Quanto ao circuito da Figura 2.3a, o cálculo da eficiência η baseia-se na substituição de α_1 e α_2 (obtidos pela equação 2.7) na equação 2.10 e ainda no estudo da relação $R_1/R_2 = f(C_2/C_1)$. Depois de feitas pequenas aproximações e considerando uma vez mais $\alpha_2 \gg \alpha_1$, tem-se que [1]:

$$\eta \cong \frac{1}{1 + (C_2/C_1)} \frac{1}{1 + (R_1/R_2)} \quad (2.15)$$

A comparação da equação 2.15 com a equação 2.14 mostra que a eficiência diminui devido ao fator adicional $1/(1 + R_1/R_2)$. Como a relação (R_1/R_2) depende da forma de onda, a dependência exclusiva de (C_2/C_1) é perdida.

Quanto ao dimensionamento dos componentes do circuito, têm de ser calculados os valores das resistências R_1 e R_2 , já que os valores das capacidades C_1 e C_2 são geralmente conhecidos e dimensionados de modo a obter uma boa eficiência (equações 2.14 e 2.15), considerando uma certa gama para C_2 [1]. R_1 e R_2 podem ser calculadas usando a equação 2.11 e os valores de a e b para cada circuito (equações 2.4 e 2.5). As constantes de tempo calculadas para cada circuito também diferem [2]. Sendo assim, para o circuito da Figura 2.3a vem, segundo [1]:

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{1}{2C_1} \left[\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) - \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C_1 + C_2)}{\alpha_1 \alpha_2 C_2}} \right]; \\ R_2 &= \frac{1}{2(C_1 + C_2)} \left[\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C_1 + C_2)}{\alpha_1 \alpha_2 C_2}} \right]; \\ \tau_1 &= \frac{1}{\alpha_2} = (R_1 + R_2)(C_1 + C_2); \quad \tau_2 = \frac{1}{\alpha_1} = \left(\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right) \left(\frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \right). \end{aligned} \quad (2.16)$$

Para o circuito da Figura 2.3b, segundo [1], vem:

$$\begin{aligned}
 R_1 &= \frac{1}{2C_2} \left[\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) - \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C_1 + C_2)}{\alpha_1 \alpha_2 C_1}} \right]; \\
 R_2 &= \frac{1}{2(C_1 + C_2)} \left[\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C_1 + C_2)}{\alpha_1 \alpha_2 C_1}} \right]; \\
 \tau_1 &= \frac{1}{\alpha_2} = R_2(C_1 + C_2); \quad \tau_2 = \frac{1}{\alpha_1} = R_1 \left(\frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \right).
 \end{aligned} \tag{2.17}$$

Todas as equações anteriores contêm as constantes de tempo $1/\alpha_1$ e $1/\alpha_2$, que dependem da forma da onda. No entanto, não há uma relação simples entre as constantes de tempo e os tempos T_1, T_2, T_p e T_h , definidos nas Figuras 2.1 e 2.2 [1]. A Tabela 2.1, obtida a partir de [1], mostra os resultados de algumas formas de onda no que diz respeito às constantes de tempo e aos tempos de frente e de cauda.

Tabela 2.1: Resultados de algumas formas de onda

T_1/T_2 (μs)	T_p/T_h (μs)	$1/\alpha_1$ (μs)	$1/\alpha_2$ (μs)
1,2/5	—	3,48	0,80
1,2/50	—	68,2	0,405
1,2/200	—	284	0,381
250/2500	—	2877	104
—	250/2500	3155	62,5

2.1.3 Medição de Tensões de Impulso

Os ensaios impulsivos na indústria são usados principalmente para controlar a qualidade dos equipamentos em AT. Normalmente, o objecto a ensaiar é submetido a um impulso de tensão atmosférico com uma determinada forma, de acordo com as normas. As mudanças na forma de onda causadas pelo objecto a ensaiar são usadas para detecção de defeitos de isolamento [3].

As medições em AT envolvem problemas que podem não ser familiares aos especialistas em técnicas comuns de medições eléctricas. Os equipamentos em AT têm capacidades parasitas enormes no que diz respeito às estruturas ligadas à terra e conseqüentemente estabelecem-se campos eléctricos muito intensos. Para minimizar estes problemas são necessárias estruturas enormes, que controlem os campos eléctricos e evitem o contornamento dos equipamentos em relação às estruturas ligadas à terra. Por vezes é também

necessário que estas estruturas controlem a dissipação de calor dentro dos circuitos, de acordo com [4].

A Figura 2.6, adaptada de [1], ilustra a disposição do circuito mais comum para ensaios em AT [1].

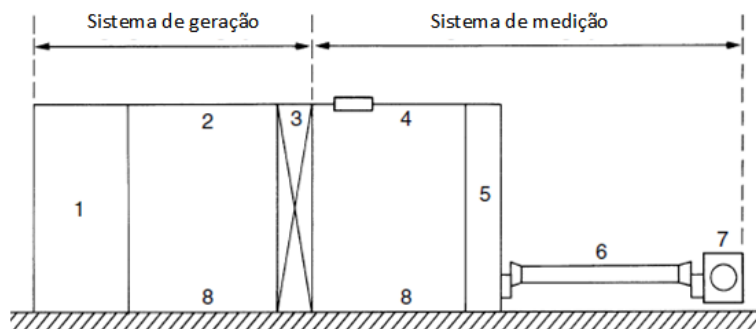


Figura 2.6: Sistema básico para ensaios de alta tensão

O gerador de alta tensão 1 está ligado ao objecto a ensaiar 3 através da ligação 2, formando o sistema de geração. Normalmente a ligação 2 para o objecto a ensaiar inclui uma impedância ou uma resistência para amortecer as oscilações ou limitar as correntes de curto-circuito em caso de falha do objecto a ensaiar, segundo [1]. A ligação 4 do objecto sob ensaio para o divisor de tensão 5 e o instrumento de registo 7, cujo cabo de medição 6 é colocado entre os seus terminais e a parte inferior do divisor de tensão, formam o sistema de medição. O retorno pela terra 8 deve assegurar a inexistência de quedas de tensão significativas e manter o potencial do solo o mais próximo possível da terra, segundo [1].

O valor de pico das tensões de impulso pode ser medido com a ajuda de disruptores ou através de dispositivos de medição apropriados, tal como osciloscópios ou digitalizadores, que permitem obter a característica temporal completa da onda de tensão, segundo [2].

2.1.3.1 Medição do Valor de Pico com eléctrodos esféricos

Neste ponto pretende-se dar a conhecer, de forma sintetizada, no que consiste a medição através do sistema composto por um intervalo de ar com dois eléctrodos esféricos nas extremidades.

De acordo com [2], a disrupção num sistema com eléctrodos esféricos demora apenas alguns microssegundos, se a tensão aplicada exceder o valor máximo da tensão de disrupção, \hat{U}_d , para tensões alternadas. Sendo assim, este sistema pode ser usado para medir o valor máximo das tensões de impulso que não tenham uma duração demasiado curta. O limite corresponde a aproximadamente $T_2 \geq 40 \mu s$, segundo [2].

Há dois arranjos básicos para as medições com eléctrodos esféricos. O arranjo horizontal é normalmente utilizado para esferas com diâmetro $D < 50$ cm e o arranjo vertical para as esferas com diâmetro superior ao indicado, de acordo com [2].

Uma característica singular de medir o valor de pico das tensões de impulso com eléctrodos esféricos é o facto de que, em função da ocorrência ou ausência de uma só disrupção, é impossível determinar quão perto o valor de pico \hat{U} da tensão de impulso aplicada está da tensão de disrupção \hat{U}_d . Isto só pode ser determinado através da aplicação de sucessivos impulsos, de acordo com [2]. Para este efeito, a amplitude da sequência das tensões de impulso é variada sistematicamente até que cerca de metade dos impulsos levem à disrupção, ou seja, a probabilidade de disrupção $P(U)$ corresponde a cerca de 50% [2]. Então, para esta tensão de impulso tem-se, segundo [2]:

$$U_{d-50} \approx \hat{U}_d \approx d \cdot \hat{U}_{d0}$$

Onde d representa a densidade relativa do ar e \hat{U}_{d0} é a tensão de disrupção segundo as condições *standard*. A função de distribuição da tensão disruptiva $P(\hat{U})$, mostrada na Figura 2.7 (adaptada de [2]), pode-se determinar pelo esforço repetido do arranjo de eléctrodos esféricos, segundo [2].

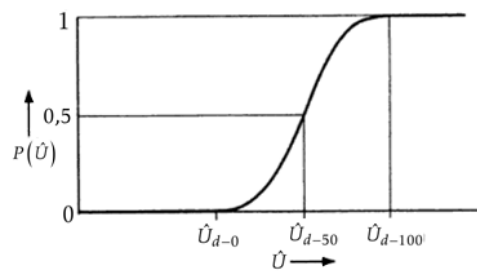


Figura 2.7: Função de distribuição da tensão disruptiva de eléctrodos esféricos

Constata-se pela Figura 2.7 que a tensão de sustentação \hat{U}_{d-0} e a tensão disruptiva garantida \hat{U}_{d-100} , correspondentes a uma probabilidade de disrupção de 0 % e 100 %, respectivamente, apenas são definidas de forma aproximada, portanto não se adequam como características, de acordo com [2]. Segundo as especificações (VDE 0433-2; IEC Publ. 52) os eléctrodos esféricos são adequados à medição dos valores de pico das tensões de impulsos atmosféricos com uma incerteza de medição associada de $\pm 3\%$.

2.1.3.2 Ensaio "Tensões de Impulso"

Os tópicos abordados neste ensaio recaem sobre os seguintes temas já tratados anteriormente:

- Tensões de impulsos atmosféricos;
- Circuitos de geração de tensões impulsivas de um único nível;
- Medição do Valor de Pico com eléctrodos esféricos;

- Probabilidade de disrupção.

Neste tipo de ensaios, as tensões de impulso com uma frente de onda $T_1 = 1,2 \mu s$ e um tempo de meia amplitude de onda $T_2 = 50 \mu s$ são as mais usadas. Por norma, as tensões de impulso são geradas por qualquer um dos dois circuitos básicos mostrados na Figura 2.3, segundo [2].

Intervalo de disrupção

As descargas disruptivas nos gases ocorrem devido a uma avalanche – processo cumulativo em que uma partícula carregada origina, por colisão com as moléculas do gás, um grande número de partículas carregadas (IEV 531-13-02). No caso de haver lacunas no ar, a iniciação da descarga é realizada pelos portadores de carga que acontece estarem numa posição favorável no campo. Se no instante em que a tensão aplicada excede a tensão de início da requerida ionização (U_e) não está disponível um portador de carga no local adequado, o início da descarga é adiado por um tempo designado como intervalo estatístico t_s , de acordo com [2, 5]. Mesmo após o início da primeira avalanche decorre um determinado tempo, necessário para o desenvolvimento do canal de descarga, conhecido como o intervalo de formação t_a . O intervalo total de disrupção, entre a superação do valor U_e em t_1 e o começo do colapso da tensão na disrupção, concilia duas componentes, segundo [2, 5], mostradas na equação 2.18.

$$t_v = t_s + t_a \quad (2.18)$$

Estas relações estão explicitadas na Figura 2.8, adaptada de [5].

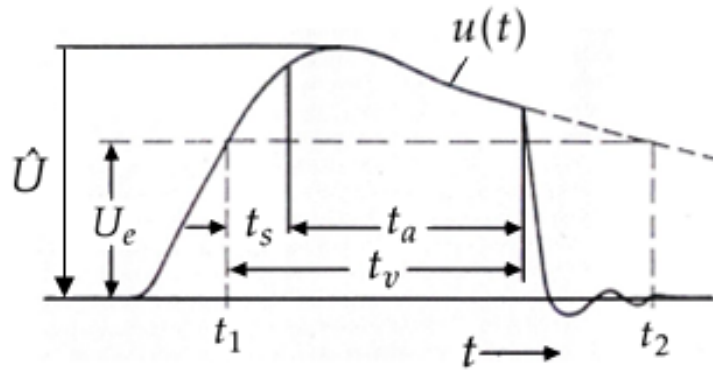


Figura 2.8: Determinação do intervalo de disrupção

Probabilidade de disrupção

Como condição para a disrupção, pode-se esperar que o intervalo durante o qual a tensão aplicada excede U_e seja maior que o intervalo de disrupção t_v . Tendo em conta que t_v não é constante, o esforço repetido do disruptor com tensões de impulso de amplitude de pico constante ($\hat{U} > U_e$) não conduz sempre à disrupção. Sendo assim, para cada valor

médio do intervalo de disrupção pode associar-se um valor médio de tensão de disrupção \hat{U}_{d-50} , para o qual metade dos ensaios resultam em disrupção, segundo [2].

Então é atribuída uma probabilidade de disrupção P a cada valor de pico \hat{U} de uma tensão de impulso com uma determinada forma. A função de distribuição $P(\hat{U})$ está representada na Figura 2.7 para o caso do sistema composto por eléctrodos esféricos. A probabilidade de disrupção é zero caso $\hat{U} < U_e$ e, em primeiro lugar, atinge o valor do limite inferior \hat{U}_{d-0} , conhecido como tensão de sustentação. \hat{U}_{d-50} é o valor sobre o qual os ensaios de disruptores se devem basear. A tensão disruptiva garantida \hat{U}_{d-100} representa o limite superior da zona de dispersão, de acordo com [2].

Característica tensão-tempo

Quando se aplica uma tensão de impulso suficientemente elevada a um disruptor, cada valor de tensão aplicada resulta em disrupção. O tempo necessário para o desenvolvimento da faísca depende da taxa de aumento da tensão e da geometria do campo. Consequentemente, para cada geometria de disruptores, é possível obter a correspondente característica tensão-tempo, ao aplicar uma série de impulsos de amplitude crescente e observar graficamente o intervalo de disrupção, segundo [1]. Na Figura 2.9, adaptada de [1], mostra-se o esboço de uma característica tensão-tempo.

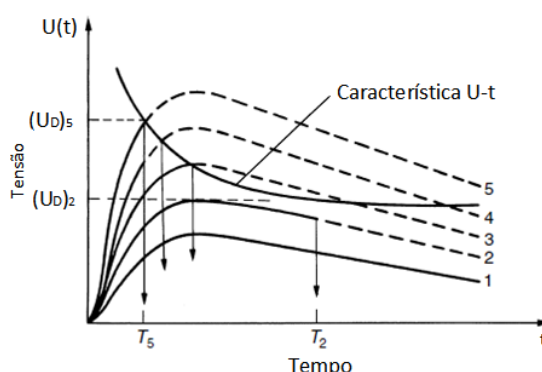


Figura 2.9: Característica tensão-tempo

A característica tensão-tempo é uma propriedade muito importante, em termos práticos, de qualquer dispositivo ou estrutura de isolamento. Fornece as bases para estabelecer a rigidez do isolamento ao impulso e para o projeto do nível de proteção contra sobretensões, de acordo com [1].

2.2 Digitalizadores em Ensaios Impulsivos

Embora o uso de equipamentos digitais esteja difundido há muitos anos, só durante a década de 90 é que a sua utilização para medições em ensaios de AT se tornou universal, segundo [1]. Com o aparecimento dos digitalizadores, o ramo das medições de impulsos em AT conseguiu uma ferramenta fundamental. Comparado com os voltímetros ou os

osciloscópios analógicos, o digitalizador oferece a possibilidade de gravação e posterior processamento dos dados e da visualização das formas de onda [2]. Os digitalizadores permitem ainda medir as tensões de ensaio e os parâmetros temporais das mesmas, segundo [6].

Em primeiro lugar apresenta-se o digitalizador usado no projecto (RTD 710A), com uma breve descrição do mesmo. De seguida, exhibe-se o digitalizador 7612D, com características muito semelhantes às apresentadas pelo RTD 710A, ambos da empresa Tektronix. Posteriormente, e tendo em conta que o software de avaliação tem sido continuamente actualizado ao longo dos anos [7], é apresentado um digitalizador muito mais recente da empresa HBM, o digitalizador isolado 7600. Por último, mostra-se um sistema completo de medição de impulsos, que engloba não só os digitalizadores mas também as unidades de alimentação, armazenamento, o computador de controlo e dispositivos periféricos.

2.2.1 Digitalizador RTD 710A

O digitalizador RTD 710A da Sony/Tektronix é um instrumento baseado num microprocessador, totalmente programável, com dois canais disponíveis para digitalização. É capaz de fornecer uma resolução de 10 bits a uma taxa de amostragem máxima de 200 MHz (modo de amostragem a alta velocidade) ou a uma taxa de amostragem máxima de 100 MHz (modo de amostragem normal) [8].

Os módulos de aquisição do RTD 710A aceitam 2 sinais de entrada analógicos (*dual-channel*), convertem os sinais para a forma digital e aplicam a base temporal e outras informações para um posterior processamento [9]. Os canais de entrada têm uma resistência de entrada correspondente a 1 M Ω e uma capacidade de entrada de aproximadamente 24 pF [8]. A resistência e a capacidade intrínseca do digitalizador vão ajudar a reduzir a tensão para valores facilmente mensuráveis, juntamente com o circuito divisor de tensão ao qual vai ser ligado o equipamento.

Este digitalizador apresenta uma secção de disparo muito versátil, permitindo isolar todos os eventos relevantes. Todos os modos de disparo *standard* dos digitalizadores e osciloscópios estão disponíveis neste equipamento, que proporciona ainda outros modos de disparo que permitem o disparo em sinais que seriam muito difíceis de captar usando os modos *standard*, segundo [10].

Há a possibilidade de usar duas interfaces, a interface *standard* IEEE 488, geralmente designada por GPIB (*General Purpose Interface Bus*), e a interface de saída directa A/D (*Direct A/D Output Interface*). A primeira permite controlar remotamente o digitalizador através de um controlador GPIB, usando um conjunto de comandos programados. Neste caso todos os controlos do painel frontal, exceptuando o botão de ligar/desligar e o disparo manual (MAN TRIG), podem ser controlados através de GPIB. A segunda permite que o digitalizador seja utilizado como um conversor analógico/digital [8].

2.2.2 Outros Digitalizadores no Mercado

- Digitalizador 7612D;

O digitalizador 7612D da Tektronix, tal como o homólogo RTD 710A é um instrumento baseado num microprocessador, totalmente programável, com dois canais disponíveis para digitalização e com uma taxa de amostragem máxima de 200 MHz. Devido aos canais serem independentes, os dados digitalizados podem ser lidos por um dos canais enquanto o outro canal está a fazer a aquisição dos dados. O painel frontal deste digitalizador permite o controlo total do instrumento a partir da sua interface simples e lógica [11]. As funções do digitalizador podem ser operadas manualmente ou remotamente, a partir de um programa de controlo de acordo com o barramento IEEE-488 [12]. Este equipamento tornou-se obsoleto em 1990, segundo [13]. Pode ser consultado o manual de instruções [11] para informações adicionais e mais detalhadas sobre o digitalizador em questão.

- Digitalizador isolado 7600;

O digitalizador isolado 7600 da HBM foi projectado para aplicações que necessitem de isolamento em AT e para possibilitar medições precisas em ambientes severos. Este digitalizador possibilita uma maior gama de temperatura e uma robustez mecânica melhorada, de acordo com [14]. Com a colaboração de laboratórios de AT da Europa, a HBM desenvolveu este digitalizador, em que o subsistema de digitalização está isolado a fibra óptica, com ligação digital. Segundo a HBM este modelo de digitalizador foi concebido para ir ao encontro das exigências das medições em AT [14]. No documento disponível em [14] podem ser encontradas informações mais detalhadas acerca deste dispositivo.

- Sistema digital de análise de impulsos HIAS[®] 743;

O HIAS[®] 743 da Haefely Hipotronics é um sistema digital de análise de impulsos de alta resolução, com precisão de múltiplos canais, pertencente à classe de desempenho mais elevada, segundo a Haefely Hipotronics, tendo em conta os dispositivos de medição para AT. A medição, avaliação e análise das tensões de impulso podem ser realizadas de acordo com as normas para os ensaios impulsivos em AT, IEC 61083, IEC 60060, IEC 60076, IEC 60099 e IEC 60230. Neste sistema estão disponíveis os modos de avaliação automática e avaliação manual da forma dos impulsos especificados nas normas mencionadas. Este sistema integra uma unidade principal que contém a CPU, o computador de controlo, fontes de alimentação, armazenamento de dados, interfaces e 4 ranhuras para digitalizadores. Todos os elementos de precisão são combinados num pequeno módulo, em cada canal. A grande vantagem desta abordagem modular é que os digitalizadores podem ser facilmente retirados para se efectuar uma recalibração, caso seja necessário, garantindo a continuidade do funcionamento do sistema através dos outros canais disponíveis [7]. No documento

disponível em [7] estão pormenorizadas as características fundamentais deste sistema de análise de impulsos, bem como os principais benefícios e aplicações do equipamento.

ARQUITETURA E IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE ENSAIO

Neste capítulo é apresentada a arquitetura utilizada para o sistema de ensaio bem como a sua implementação. O capítulo foi subdividido em cinco secções, apresentadas de seguida.

A primeira secção, 3.1, engloba uma descrição geral do sistema e as principais normas de segurança para ensaios de alta tensão. A secção 3.2 aborda como é feita a alimentação do sistema. Na secção 3.3 é apresentado o equipamento usado no sistema de ensaio e a sua finalidade. De seguida, na secção 3.4 é apresentado o esquema do circuito de geração e medição de tensões impulsivas. Por último, na secção 3.5 exhibe-se a cadeia de isoladores usada no projeto bem como a explicação por detrás da estrutura em que a mesma se insere.

3.1 Descrição Geral e Normas de Segurança

Todos os ensaios em AT, nos laboratórios de todo o mundo, são realizados com equipamento de ensaio próprio, especialmente projetado para ensaios laboratoriais e não para uso industrial. Este equipamento faz parte de um *kit* que permite de forma bastante intuitiva reconfigurar as montagens, dado que todos os componentes podem ser manuseados facilmente por uma pessoa, à exceção do transformador de ensaio, devido ao seu peso. Os componentes deste *kit* foram inicialmente projetados pela já extinta companhia alemã *Messwandler-Bau GmbH*, agora *Trench Germany GmbH*. Hoje em dia, estes *kits* já são produzidos por diferentes fabricantes, tais como Terco, Haefely e W. S. Test Systems, mantendo sempre o projeto inicial, o que permite haver uma intermutabilidade entre os componentes pertencentes ao *kit*, mesmo que estes sejam desenvolvidos por fabricantes diferentes [15].

Todo o equipamento envolvido num ensaio em AT está encerrado numa cela com paredes de rede metálica e chão igualmente metálico, para garantir que todos os componentes estejam ao mesmo potencial. Os operadores responsáveis pelo ensaio e os equipamentos de medida encontram-se no exterior da cela. As paredes e o chão da cela estão ligados a um circuito de terra de proteção especialmente desenvolvido para este laboratório, com resistência de terra inferior a $1\ \Omega$, segundo [15].

O laboratório de alta tensão presente na cave do DEE está previsto para três celas, apesar de atualmente apenas uma estar operacional. Esta cela é alimentada através de:

- Quadro geral da sala;
- Quadro da cela, equipado com várias proteções.

Na cela, em série com a alimentação dos equipamentos estão quatro interruptores de segurança:

- Interruptor de chave, no quadro da cela;
- Interruptor de emergência, de maçaneta, na parede da cela;
- Micro-interruptor sensor da porta da cela;
- Micro-interruptor da posição da vara de terra na porta da cela.

Com isto, garante-se que se não estiverem todos os interruptores ligados não se consegue alimentar o interior da cela, o que obriga a que a chave esteja na porta, o interruptor de emergência não esteja pressionado, a porta esteja fechada e vara de terra na sua posição frente à porta.

Ao entrar na cela, é obrigatório empunhar a vara de terra e tocar com a sua ponta metálica, que está ligada à terra, em todos os pontos metálicos da montagem, principalmente o transformador de ensaio e o condensador de impulso, pois este fica carregado com toda a alta tensão e leva algum tempo a descarregar. Mesmo passado algum tempo sem trabalhar no laboratório, sempre que se entra na cela deve seguir-se este procedimento, como forma de precaução.

3.2 Alimentação da Montagem

A alta tensão utilizada no laboratório é produzida no secundário do transformador de ensaio (*test transformer*) que pertence ao *kit*, de 220 V / 100 kV, 10 kVA. Então, para variar o valor da alta tensão produzida, tem de se variar a tensão de alimentação do primário deste transformador.

Sendo assim, a alimentação do primário do transformador de ensaio é proveniente do secundário de um autotransformador de alimentação, no qual é possível variar o número de espiras do secundário. Assim, obtém-se a variação de tensão desejada no primário do transformador de ensaio. Esta variação é conseguida através de um motor interno do autotransformador, bastando atuar um botão de comando para variar a tensão de tensão de saída do mesmo. É portanto uma variação motorizada [15].

Um autotransformador é constituído por apenas uma bobine, o que significa que não faz separação galvânica entre o seu primário e o seu secundário. Então, o neutro da rede de alimentação fica aplicado diretamente ao ponto de referência do transformador de ensaio (a sua massa), o qual está ligado à terra de proteção do laboratório, por imperativos das normas de segurança. Sabendo que a terra de serviço (neutro da rede) não tem necessariamente de ser equipotencial à terra de proteção, esta ligação direta provoca uma pequena corrente entre as duas terras, que por sua vez é sentida pelas proteções diferenciais do quadro da cela, fazendo-as disparar [15].

Consequentemente, o transformador de ensaio e a rede devem ter entre eles uma separação galvânica para evitar a situação descrita. De modo a resolver este problema, o autotransformador deve estar ligado a um transformador de isolamento de 230 V / 230 V, que por sua vez é ligado ao transformador de ensaio. O propósito deste transformador de isolamento é permitir que a terra de serviço não seja aplicada no mesmo ponto que a terra de proteção. A Figura 3.1 mostra o esquema da alimentação da montagem, desde a rede de alimentação até ao transformador de ensaio, onde se pode visualizar a separação criada para evitar a circulação de correntes que façam disparar as proteções.

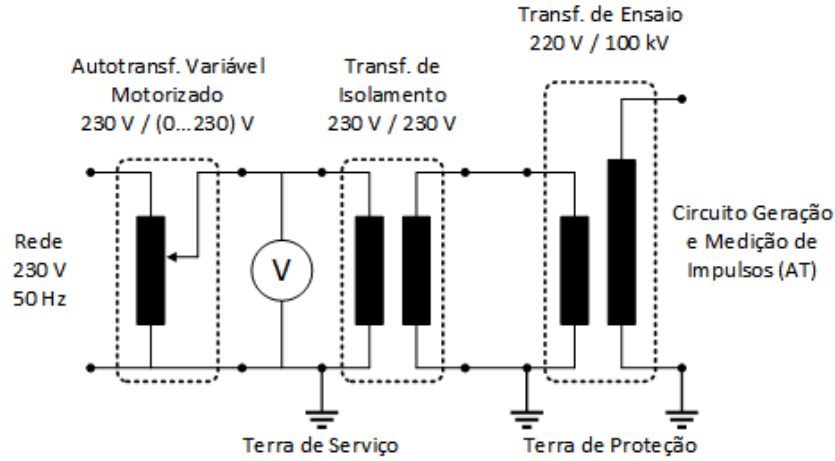


Figura 3.1: Esquema de alimentação da montagem

Por não ser possível medir a tensão no secundário do transformador de ensaio devido à falta de aparelhagem de AT, ao longo dos ensaios mediu-se a tensão no primário do transformador de ensaio, ou seja, à saída do autotransformador, em Baixa Tensão (BT). Recorreu-se para isso a um voltímetro, como está representado na Figura 3.1.

O valor eficaz da tensão AT de cada ensaio deduz-se do valor eficaz da tensão medida, através de um voltímetro, multiplicada por $100/0,22$, que corresponde à relação de transformação fixa do transformador de ensaio. Como um dos objetivos neste tipo de ensaios é saber as tensões de disrupção, que correspondem à tensão máxima obtida, em AT, vem então deduzida da eficaz, na equação 3.1:

$$U_{AT-max} = \sqrt{2} \cdot \frac{100}{0,22} \cdot V_{BT-ef} \quad (3.1)$$

3.3 Equipamento Usado

A Tabela 3.1 mostra a lista de componentes pertencentes ao *kit*, neste caso da Terco, que fazem parte do circuito de geração e medição das tensões de impulso, tendo como base os documentos referidos em [16, 17]. É incluído o código do modelo de cada componente, a quantidade usada na configuração de ensaio e qual o propósito de cada elemento para o circuito. Note-se que apenas foi incluído o equipamento pertencente ao *kit*, visto que os componentes integrantes da alimentação da montagem foram explicitados no capítulo 3.2. Os elementos que não fazem parte do *kit* e que possam ser incluídos posteriormente na montagem serão esclarecidos oportunamente.

Tabela 3.1: Componentes básicos da configuração de ensaio com tensões de impulso

Modelo Terco	Descrição do Componente	Quantidade	Finalidade do Componente
HV 9105	Transformador de Ensaio	1	Produzir alta tensão alternada
HV 9108	Varão de Ligação	1	Elemento de ligação condutor
HV 9109	Peça de Ligação	7	Elemento condutor. Suporta 4 elementos inseridos horizontalmente e 2 verticalmente
HV 9110	Suporte de Chão	7	Elemento condutor. Suporta 1 elemento inserido verticalmente e até 4 barras separadoras inseridas horizontalmente
HV 9111	Retificador de Silício	2	Retificador para utilização na geração de tensões de impulso
HV 9112	Condensador de impulso	1	Produzir tensões de impulso
HV 9119	Barra Separadora	5	Ligação mecânica e elétrica ao nível do solo quando inserida no suporte de chão
HV 9120	Condensador de Carga	1	Divisor capacitivo de alta tensão para medição de tensões de impulso
HV 9121	Resistência de Carga	1	Limitadora de corrente
HV 9122	Resistência de Frente de Onda	1	Determina o tempo de subida da tensão de impulso na geração de impulsos atmosféricos e de manobra
HV 9123	Resistência de Cauda de Onda	1	Determina o tempo de meia amplitude da tensão de impulso na geração de impulsos atmosféricos e de manobra
HV 9124	Varão Isolador	2	Elemento isolador
HV 9125	Disruptor de Esferas	1	Geração de tensões de impulso e predefinição do valor máximo das mesmas
HV 9126	Unidade de Controlo para o Disruptor de Esferas	1	Controlo remoto do espaço entre as esferas do disruptor. Montado em baixo do disruptor e ligado ao mesmo através de um eixo de transmissão
HV 9130	Divisor de Baixa Tensão	1	É ligado à tomada UHF do condensador de carga e conecta-se ao voltímetro de impulsos através de um cabo coaxial
HV 9138	Terminal para evitar o Efeito de Coroa	1	Serve como terminação do condensador de impulso para diminuir a intensidade do campo
HV 9141	Condensador de Medição	1	Divisor capacitivo de alta tensão para medição de tensões alternadas
HV 9152	Voltímetro de Impulsos	1	Medição do valor máximo da tensão de impulso
HV 9200	Cabo Coaxial	1	Faz a ligação entre o voltímetro de impulsos e o divisor de baixa tensão

Além do equipamento mencionado na Tabela 3.1 vai ser ainda adicionado ao circuito o objeto a ensaiar, uma cadeia de isoladores. No fundo, é esse o objetivo do projeto, estudar o comportamento da cadeia de isoladores perante uma descarga atmosférica. Caso seja necessário, pode ser adicionado um condensador em paralelo com o condensador de carga, aumentando desta forma a capacidade do divisor de tensão, para que a tensão medida

seja mais baixa. Isto possibilita uma melhor visualização da forma de onda da tensão de impulso nos instrumentos de medidas que apresentam limitações de escala.

3.4 Montagem do Circuito de Ensaio

Neste capítulo pretende-se dar a conhecer qual a configuração de ensaio escolhida para o circuito montado no laboratório. A Figura 3.2 mostra o esquema do circuito de geração e medição de tensões de impulso. Note-se que o circuito de geração tem como base o circuito básico b, presente na Figura 2.3b. Como a tensão de entrada dos circuitos de geração é contínua, teve de ser feita a conversão através dos retificadores, visto que a tensão à saída do transformador de ensaio é alternada. Então, foram usados dois retificadores em série, funcionando como uma proteção extra para o circuito, pois a tensão é mais distribuída.

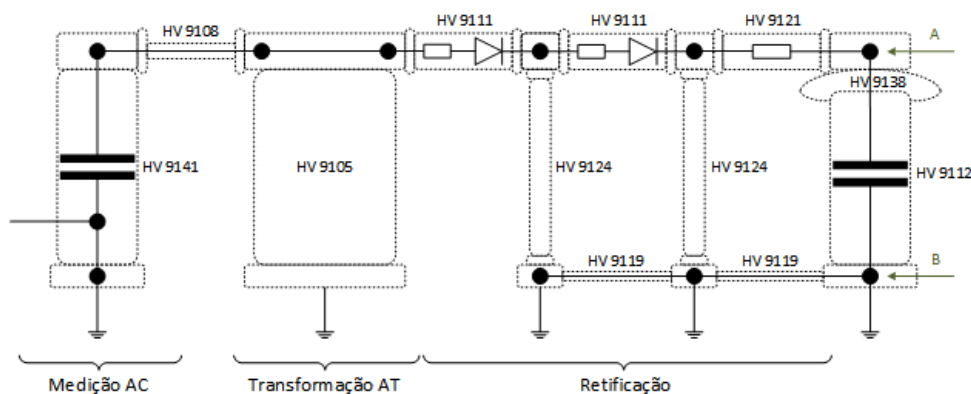


Figura 3.2: Diagrama de configuração da medição de tensões de impulso

A Figura 3.3 mostra a continuação do diagrama a partir dos pontos A e B assinalados a verde, onde é completado o circuito com os componentes responsáveis por dar forma às ondas da tensão de impulso e pela medição das mesmas.

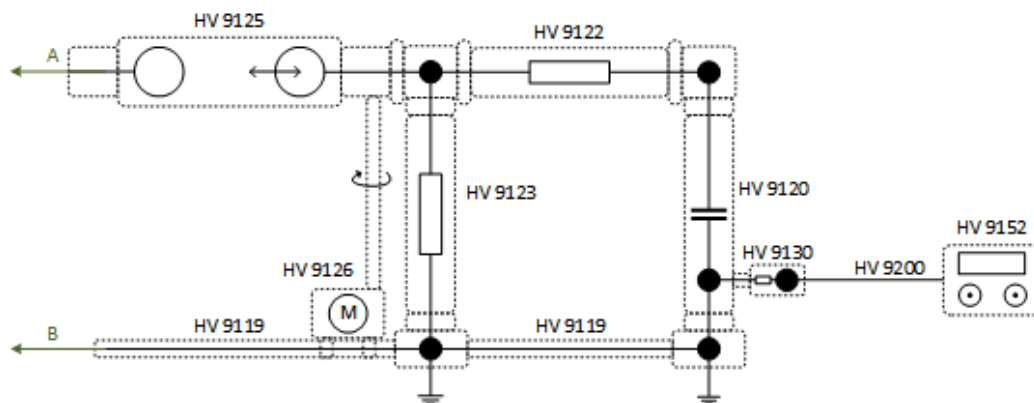


Figura 3.3: Diagrama de configuração da medição de tensões de impulso (continuação)

O afastamento ou a aproximação das esferas do disruptor era suposto ser motorizado,

a partir da unidade de controlo *High Voltage* (HV) 9126. Contudo, não foi possível concretizar a motorização, devido à falta da aparelhagem necessária para o efeito. O afastamento ou a aproximação será então manual, recorrendo ao varão de ligação entre o disjuntor de esferas e a unidade de controlo, rodando o mesmo no sentido anti-horário caso se queira o afastamento das esferas ou no sentido horário caso se queira a sua aproximação.

A ligação do circuito ao instrumento de medição faz-se através do painel traseiro do voltímetro de impulsos, utilizando para o efeito um cabo coaxial com conectores Bayonet Nut Coupling (BNC) em ambas as extremidades. Uma das extremidades é ligada ao canal desejado do osciloscópio ou digitalizador e a outra à respetiva entrada no painel traseiro do voltímetro de impulsos. A ligação do voltímetro de impulsos ao resto do circuito está esquematizada na Figura 3.3.

Com o circuito montado já é possível calcular a eficiência do mesmo, recorrendo à equação 2.14. Para tal, é necessário saber o valor das capacidades C_1 e C_2 . O condensador C_1 corresponde ao condensador de impulso e tem o valor de 25 nF . O condensador C_2 representa a carga máxima, ou seja, o objeto a ensaiar e todas as outras capacidades em paralelo com o mesmo. Neste caso, engloba o condensador de carga que está em série com o divisor de baixa tensão e o objeto a ensaiar que está em paralelo com estes.

Sendo a capacidade equivalente C_{eq} a série do condensador de carga (C_{carga}) e do divisor de baixa tensão (C_{bt}), vem então:

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_{carga}} + \frac{1}{C_{bt}} = \frac{1}{1,2\text{ nF}} + \frac{1}{425,5\text{ nF}} \Rightarrow C_{eq} \approx 1,2\text{ nF} \quad (3.2)$$

É perceptível pela equação 3.2 que a capacidade associada ao divisor de baixa tensão não tem influência no cálculo da capacidade equivalente, visto ter um valor muito superior ao da capacidade do condensador de carga. De forma análoga, a capacidade associada ao disco do isolador não tem influência no valor da capacidade total, visto que o seu valor é muito pequeno e pode ser desprezável. Tendo em conta que o isolador está em paralelo com a capacidade equivalente calculada na equação 3.2 e neste caso a capacidade total equivale à soma das capacidades de cada elemento, como o seu valor é muito inferior ao valor da capacidade equivalente calculada, pode ser desprezado. Então, a eficiência de tensão para este circuito, tendo em conta a equação 2.14, vem:

$$\eta \cong \frac{1}{1 + (C_2/C_1)} = \frac{1}{1 + (1,2/25)} \cong 95\%$$

Este valor aproximado para a eficiência da tensão vai ao encontro do valor indicado em [17], que corresponde a 92 %, considerando o circuito gerador de impulsos de apenas um estágio.

3.5 Cadeia de Isoladores

Os isoladores têm uma dupla função nos sistemas de energia, a nível elétrico e a nível mecânico. Em condições normais, os isoladores isolam as linhas elétricas das estruturas de suporte ligadas à terra, ou seja, evitam a passagem de corrente dos condutores para os apoios. A nível mecânico, sustentam os cabos aéreos que fazem o transporte e distribuição de energia nas estruturas metálicas, de betão ou de madeira onde estão assentes. A escolha dos isoladores depende da zona onde vai ser feita a instalação, sobretudo devido à poluição existente, fator que pode agravar o efeito de contornamento do isolamento. Os isoladores podem ser fixos ou fazer parte de uma cadeia de isoladores. Atualmente as cadeias de isoladores são predominantes em relação aos isoladores fixos, que têm caído em desuso, de acordo com [18].

No uso de cadeias de isoladores salienta-se uma vantagem óbvia. No caso de haver uma perfuração ou outro defeito incapacitante num isolador não é necessária a troca de toda a cadeia, basta trocar o isolador afetado. As cadeias de isoladores possuem ainda a vantagem de terem uma certa flexibilidade, fazendo com que os esforços mecânicos da linha sejam suavizados, segundo [18].

Neste projeto o objetivo era ensaiar uma cadeia de suspensão composta por três isoladores de vidro temperado¹, mostrada na Figura 3.4. Ao ser ensaiada esta cadeia de isoladores com o valor máximo de tensão disponível, não ocorreu o escorvamento da mesma. Devido às limitações de tensão existentes reduziu-se a cadeia de isoladores para apenas um isolador, por ser a única forma de conseguir realizar o ensaio para a determinação da tensão de ruptura U_{50} .



Figura 3.4: Cadeia composta por três isoladores de vidro temperado

O isolador da cadeia de isoladores a ensaiar é do tipo isolador de campânula e espigão

¹O vidro temperado é produzido com um processo de tratamento térmico controlado para aumentar a rigidez em comparação com o vidro normal.

de disco (IEV 471-03-07) e tem a designação 'U70BS'. O isolador está representado na Figura 3.5, onde se salienta com uma elipse de cor azul a sua designação de referência.



Figura 3.5: Designação do isolador presente no seu capacete

Para fazer a ligação do isolador à estrutura de suporte na parte superior e à linha na parte inferior foram construídas duas peças em aço e um pino de segurança em latão. Para a parte superior do isolador foi construída uma peça semelhante ao pino que este possui na parte inferior. O propósito deste pino é fazer a ligação com o capacete do isolador. Para a parte inferior foi construída uma peça semelhante ao capacete do isolador, que seja capaz de se conectar com o pino inferior do isolador e sustentar a linha elétrica. Depois de ligar esta peça é colocado o pino de segurança construído e o pino de segurança já existente para o apoio superior, para garantir que a instalação fica segura e que o isolador não desencaixa dos apoios inferior e superior. Optou-se por usar um varão de latão com um comprimento de 60 cm e um diâmetro de 18 mm para simular uma linha elétrica. As peças mencionadas encontram-se representadas na Figura 3.6.



Figura 3.6: Pino de suporte, pino de segurança, varão e capacete de sustentação da linha

É de salientar que as peças de aço construídas foram adequadamente protegidas contra a corrosão através de um processo de zincagem por imersão a quente, como especificado em [19]. Foi ainda construída uma estrutura de suporte ao isolador de perfil U invertido com 195 cm de altura e 121 cm de comprimento. Esta estrutura tem como base cantoneiras de alumínio perfuradas. A ligação do pino superior do isolador à estrutura de suporte é feita através de duas manilhas separadas por um cabo de aço com 5 mm de espessura e 1 m de comprimento enrolado duas vezes e travado por dois cerra-cabos de 6 mm, para o isolador não estar muito próximo da estrutura, na vertical. O isolador encontra-se a cerca de 130 cm do solo metálico onde está assente a estrutura.

Estas características cumprem as especificações indicadas em [19] para um comprimento da estrutura entre 76 e 152 mm, uma altura da mesma não inferior a 1 m e um condutor com diâmetro mínimo de 13 mm e um comprimento igual a 2 vezes a altura do isolador, para ambos os lados. Sabendo que a altura do isolador corresponde a 12,7 cm e o comprimento do varão é igual a 60 cm, esta última especificação é cumprida. Na norma técnica indicada em [19] também se recomenda que nenhum objeto fique a uma distância inferior a 1 m ou 1,5 vezes a altura do isolador, consoante a maior distância. Neste caso, a maior distância é 1 m e de facto nenhum objeto se encontra a essa distância da estrutura, a não ser as paredes.

Na Figura 3.7 é exibido o circuito completo que serve de suporte aos ensaios realizados e que está montado no laboratório de alta tensão, situado no departamento de engenharia eletrotécnica e de computadores da FCT/UNL.



Figura 3.7: Circuito de geração e medição de tensões de impulso, em laboratório

O acoplamento do varão ao circuito gerador das ondas de choque é feita através de cabos de cobre entrelaçados e maleáveis que vão conectar-se à peça de ligação colocada na parte superior do divisor capacitivo, como é visível na Figura 3.7. Desta forma, o objeto a

ensaiar, o isolador, fica ligado em paralelo com o circuito gerador de impulsos e os ensaios já podem ser realizados. Os cabos de cobre são presos ao varão de latão recorrendo a duas braçadeiras de aço reguláveis, para não correrem o risco de se soltarem.

A Figura 3.8 mostra a mesa de controlo, que está situada junto à cela do circuito de ensaios mas no exterior da mesma.

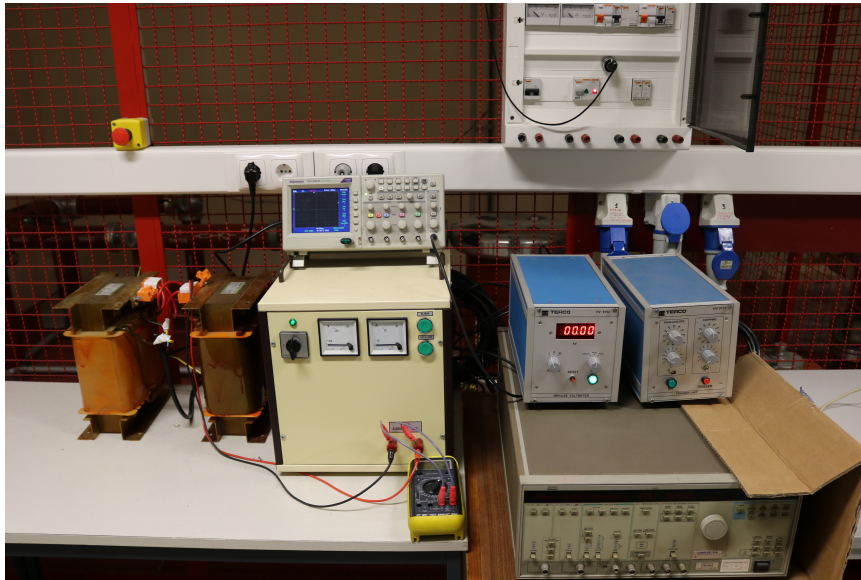


Figura 3.8: Mesa de controlo com equipamentos de geração e medição

A mesa de controlo indicada na Figura 3.8 tem as seguintes funções:

- Definir a tensão aplicada ao transformador de ensaio através do autotransformador, que é medida por intermédio de um multímetro;
- Medir a tensão de impulso sucedida no divisor capacitivo, recorrendo ao voltímetro de impulsos;
- Visualizar as formas de onda resultantes através de um osciloscópio digital.

DIGITALIZADOR RTD710A

Neste capítulo é abordada a comunicação feita com o instrumento, de forma geral e de forma mais aprofundada. O capítulo foi subdividido em três secções, apresentadas de seguida.

Na primeira secção, 4.1, é explicada a comunicação feita com o digitalizador RTD710A, no que consiste o barramento GPIB e a forma como é reconhecido o dispositivo de controlo e respetivo instrumento pelo *software Measurement & Automation Explorer* da *National Instruments*. A secção 4.2 aborda a comunicação feita com o instrumento através de vários comandos, com diferentes complexidades. Em cada caso são mostrados exemplos práticos da comunicação efetuada. Por último, na secção 4.3 exhibe-se um conjunto de janelas de interface usadas para configurar as mais diversas funções do instrumento e ter acesso às formas de onda capturadas. Em relação à comunicação levada a cabo na secção 4.2, neste caso a comunicação torna-se mais intuitiva do ponto de vista do utilizador.

4.1 Comunicação GPIB-USB

A comunicação com o equipamento RTD710A foi feita através do dispositivo de controlo GPIB-USB-*High Speed* (HS) da *National Instruments*. O GPIB-USB-HS é um dispositivo de controlo IEEE 488, para computadores com portas USB, que consegue alcançar o máximo de desempenho da especificação IEEE 488.2. Não é necessário a utilização de cabos GPIB para a ligação com o instrumento, pois pode ser utilizada a porta USB de alta velocidade [20]. O GPIB, ou IEEE-488 como foi mais tarde designado pelo IEEE, é um barramento de interface polivalente. Ou seja, é um barramento externo que usa bits em paralelo e tem uma comunicação assíncrona bidirecional com bytes em série, de acordo com [21]. Possui uma taxa de transferência de dados até 1 Mbyte/s e suporta um sistema de controlo, usualmente um computador, e até 15 instrumentos, segundo [22].

A norma IEEE 488.2, de 1987, trouxe uma maior aceitação do barramento IEEE 488 ou GPIB, através da resolução de alguns problemas existentes na norma IEEE 488. O protocolo IEEE 488.2 define como os controladores IEEE 488.2 e os instrumentos IEEE 488.2 devem comunicar, de modo a que o sistema seja eficiente, de acordo com [22].

Basicamente, o GPIB é um sistema flexível que permite a transferência de dados entre quaisquer dos instrumentos presentes no barramento, a uma velocidade adequada ao instrumento ativo mais lento. Cada dispositivo tem o seu endereço próprio no barramento. São atribuídos endereços desde 0 até 30 a cada instrumento, e não deve haver 2 instrumentos com o mesmo endereço, no mesmo barramento [23]. Os endereços podem ser mudados a qualquer altura, e no caso do RTD 710A é mudado através de comutadores no painel traseiro, como mostrado na Figura 4.1.



Figura 4.1: Comutador de parâmetros GPIB e interface de conexão IEEE 488.2, respetivamente

A seleção do modo de operação do GPIB (leitura ou leitura/escrita), endereço (1-30) e o fim de mensagem (EOI ou LF/EOI) são feitas através do comutador de parâmetros mostrado à esquerda na Figura 4.1. Cada comutador tem a sua função, de acordo com [8]:

- O primeiro comutador está na posição (0) para o instrumento poder responder aos

comandos enviados pelo controlador;

- O segundo comutador usa a posição (0) para selecionar o modo de operação leitura/escrita (*talker/listener*), e a posição (1) (TON) para selecionar o modo de operação escrita (*Talker ONLY*);
- O terceiro comutador seleciona a forma como o instrumento reconhece o fim de mensagem e a forma como termina as mensagens. Na posição (0) (*End Or Identify* (EOI)), o instrumento interpreta um byte de dados recebido com o valor lógico verdadeiro de EOI como fim de mensagem e termina as mensagens definindo EOI como *true* juntamente com o último byte. Se estiver selecionada a posição (1) (LF/EOI), o instrumento interpreta tanto o caractere *Line Feed* (LF) como um byte com EOI a *true* como fim de mensagem. O instrumento termina as mensagens com os caracteres *Carriage Return Line Feed* (CRLF) e define EOI como *true*;
- Os últimos cinco comutadores estabelecem qual o endereço do instrumento em formato binário. O endereço é determinado pela soma do valor de cada comutador (mostrado à direita), se estiver na posição (1). Tendo em conta que o comutador de parâmetros do painel traseiro do digitalizador RTD 710A mostrado na Figura 4.1 tem a posição (1) selecionada para os valores 1 e 2, resulta que a soma equivale a 3. Isto representa um endereço primário do GPIB igual a 3.

Estipulado o endereço primário, que pode ser confirmado através do botão ‘RQS ID’ do painel frontal do instrumento, executaram-se várias tarefas no programa *Measurement & Automation Explorer* (MAX) da *National Instruments* (NI). Estas tarefas englobam, de um modo geral, a comunicação básica com o instrumento via GPIB e a procura de instrumentos ligados à interface GPIB.

Após ligar o controlador GPIB-USB-HS entre o computador e o instrumento, mesmo este último estando desligado, o NI-MAX reconhece automaticamente o controlador na secção *Devices and Interfaces*. Selecionando o controlador é possível ter acesso às configurações gerais, configurações do GPIB, configurações da terminação de mensagens e configurações avançadas.

Para procurar instrumentos que estejam conectados à interface GPIB são necessárias algumas etapas:

1. Garantir que o instrumento está ligado e conectado à interface GPIB;
2. Lançar o programa NI-MAX;
3. Expandir a secção *Devices and Interfaces*;
4. Clicar com o botão direito do rato e selecionar a opção *Scan for Instruments*.

Após a procura bem sucedida, a janela resultante mostra as configurações principais do instrumento, sendo elas o nome, o modelo, o estado, o endereço primário, a identificação e o nome *Virtual Instrument Software Architecture* (VISA). A Figura 4.2 mostra o reconhecimento bem sucedido do digitalizador RTD 710A, único instrumento conectado à interface GPIB.

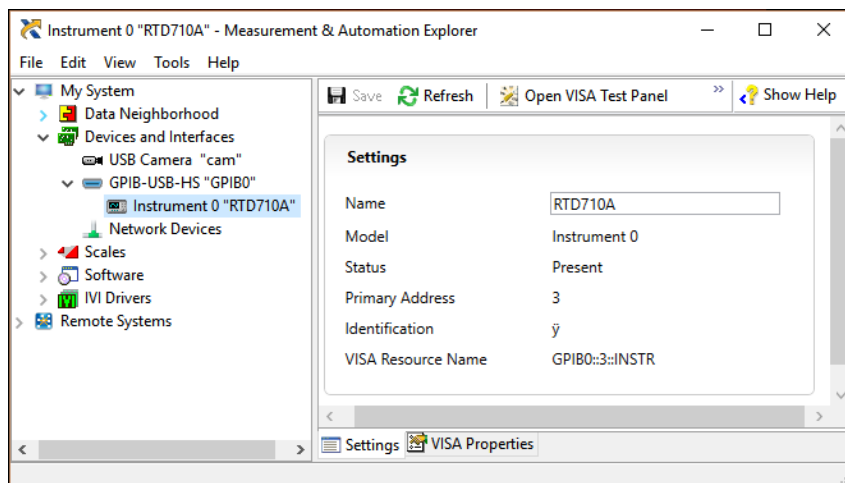


Figura 4.2: *Measurement & Automation Explorer* - Conexão com o digitalizador RTD710A

Como é visível na Figura 4.2, o instrumento foi reconhecido com sucesso pela interface GPIB, estando selecionado a azul com o nome RTD 710A. Caso apareça uma mensagem de erro a dizer que não foi possível encontrar nenhum instrumento, deve ser verificado se este está ligado e devidamente conectado à interface GPIB por meio de um cabo próprio para o efeito.

Na secção 4.2 vai ser abordada a comunicação básica e avançada que foi estabelecida com o instrumento, a partir de comandos predefinidos.

4.2 Comandos GPIB

De forma a comunicar com o instrumento recorreu-se ao painel de teste do NI-VISA, um separador na parte superior da janela quando se seleciona o instrumento em uso, mostrada na Figura 4.2, com o nome 'Open VISA Test Panel'. O VISA é uma norma para configurar, programar e para a resolução de problemas em sistemas de instrumentação, incluindo interfaces GPIB. Proporciona uma interligação entre o *hardware* e os ambientes de desenvolvimento, tais como o *LabVIEW* ou o *LabWindows/CVI* [24]. Ao abrir o separador aparece a janela do 'VISA Test Panel', onde é possível alterar as configurações do GPIB, ver uma lista das características do controlador e interagir com o equipamento. A Figura 4.3 mostra o painel em questão aberto no separador *Input/Output*, onde é testada a comunicação com o instrumento.

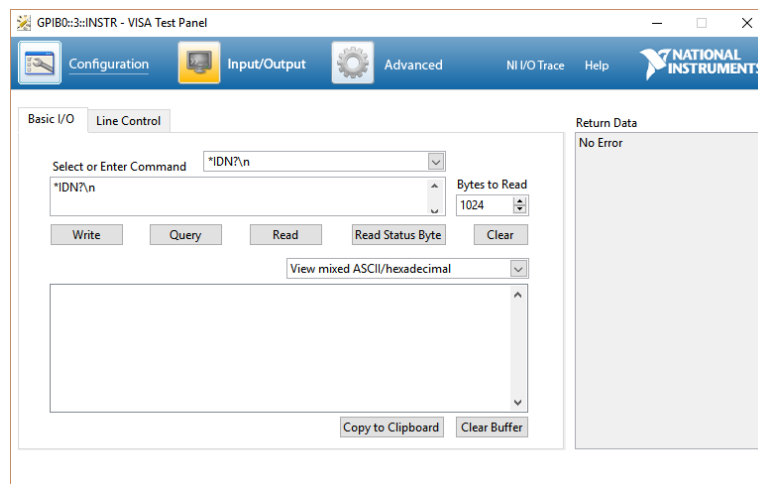


Figura 4.3: VISA Test Panel

Para comunicar com o instrumento digita-se um comando na caixa de texto indicada ou seleciona-se um comando da lista disponível e executa-se um dos seguintes procedimentos:

- Para escrever um comando ao instrumento e ler a resposta de volta clica-se no botão **Query**;
- Para escrever um comando ao instrumento, clica-se no botão **Write**;
- Para ler a resposta do instrumento, clica-se no botão **Read**.

Pode-se inicializar e calibrar o instrumento, mudar as definições de controlo, capturar uma forma de onda ou transferir formas de onda para o instrumento, e do instrumento para o controlador. Há um conjunto de comandos predefinidos usado para controlar o instrumento via GPIB, sendo que estes comandos têm uma determinada sintaxe para serem devidamente interpretados pelo digitalizador RTD 710A. São especificados em mnemónicas relativas à função que desempenham e o nome é semelhante ao nome dos comandos do painel frontal do instrumento, para facilitar a configuração do mesmo, quer remotamente, quer diretamente no painel frontal [8]. De seguida são apresentados alguns exemplos de comandos executados e a resposta dada pelo instrumento, como forma de garantir o bom funcionamento.

Para alterar o modo de entrada é utilizado o comando 'VMode' seguido do argumento 'CH1'. Este comando pertence ao grupo *Vertical System Control Group*. Neste caso, selecciona-se apenas o canal 1 como modo de entrada. O resultado é apresentado na Figura 4.4.

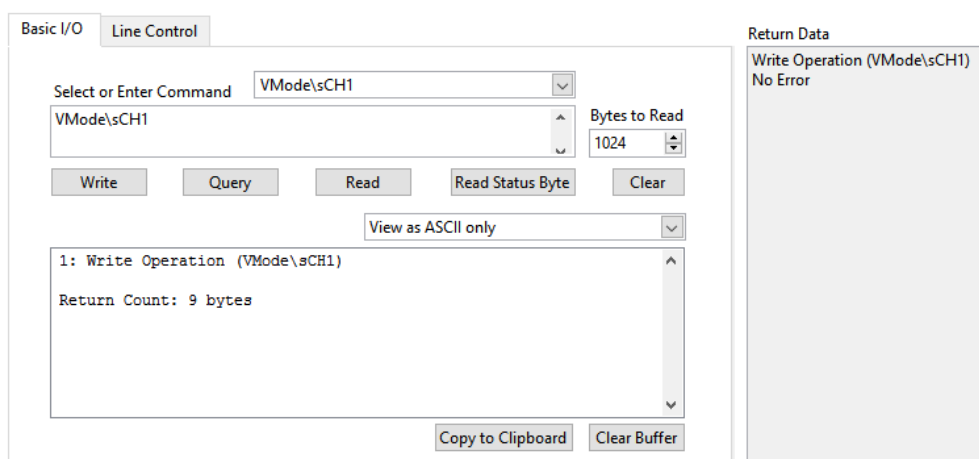


Figura 4.4: Configuração do modo de entrada do canal 1

Para confirmar se foi atingido o resultado pretendido utiliza-se o comando 'VMode?' que devolve qual a seleção atual do modo de entrada, pressionando o botão **Query**. Na Figura 4.5 é exibida a janela de resposta para este comando.

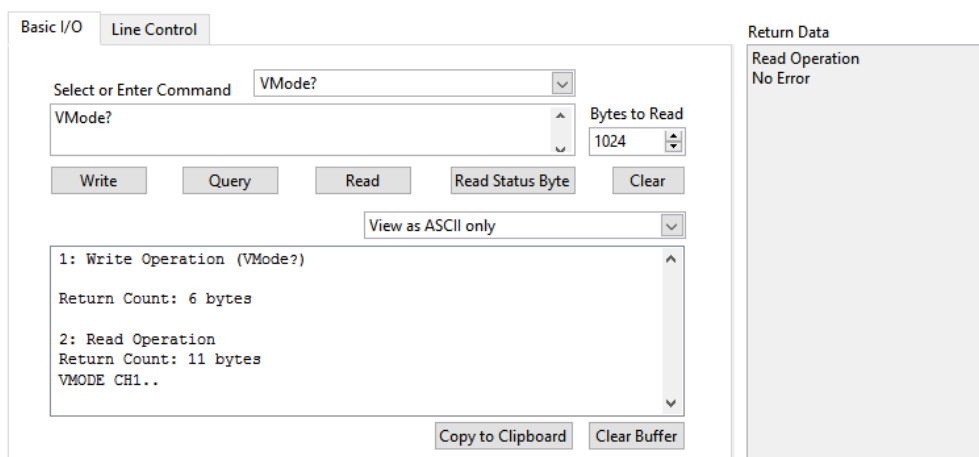


Figura 4.5: Query do comando 'VMode'

A resposta do digitalizador foi 'VMODE CH1', como era desejável, visto que o modo de entrada foi programado para ser apenas o canal 1.

Para mudar as configurações dos canais de entrada, tais como a gama de tensão, a unidade de medida, o *offset* ou o acoplamento, utiliza-se o comando 'CH1' (cabeçalho) pertencente ao grupo *Vertical System Control Group*, para o caso do canal de entrada ser o canal 1. Depois colocam-se os argumentos ('Range', 'Unit', 'Offset' e 'Coupling') seguidos dos argumentos de ligação (valores dos argumentos). Note-se que os argumentos estão separados dos argumentos de ligação através do separador ':', e os conjuntos argumento-argumento de ligação estão isolados entre si através do separador ','. Há ainda a possibilidade de escrever vários comando em simultâneo, desde que os cabeçalhos estejam separado por ';'.

A Figura 4.6 mostra a forma como o comando é enviado para o instrumento.

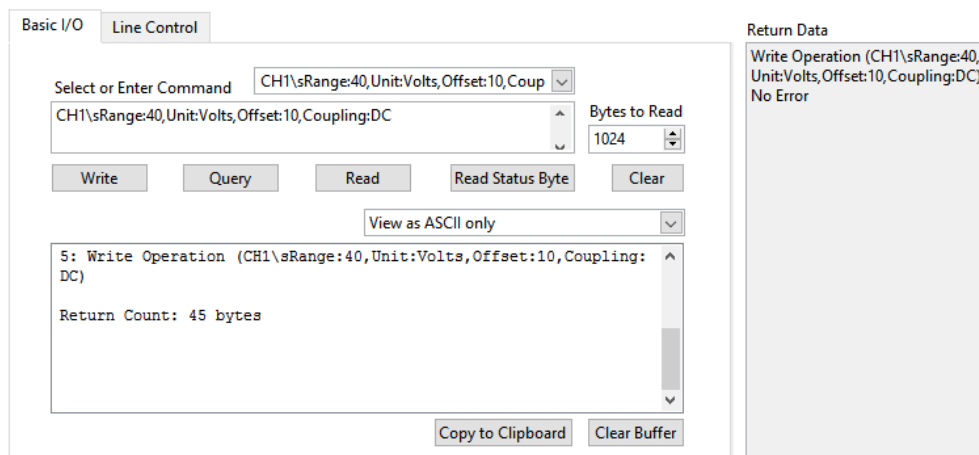


Figura 4.6: Configuração do canal 1

Para comprovar que resultado pretendido foi alcançado utiliza-se o comando 'CH1?' que devolve as configurações respeitantes ao canal 1, pressionando o botão **Query**. Na Figura 4.7 é apresentada a janela de resposta para este comando.

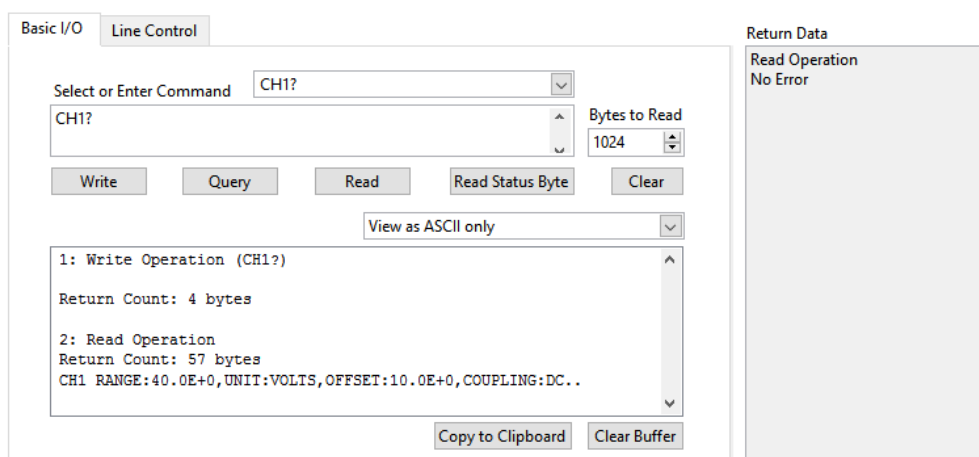


Figura 4.7: Query do comando 'CH1'

A resposta do digitalizador foi 'CH1 RANGE:40.0E+0,UNIT:VOLTS,OFFSET:10.0E+0, COUPLING:DC', como era suposto, dado que o canal 1 foi programado para ter uma gama de entrada de 40 V, com um offset de 10 V e um acoplamento DC.

O comando 'Record', que faz parte do grupo *Time Base and Recording Group*, seleciona qual o modo de registo dos dados, através do argumento 'Mode', e define a localização da forma de onda na memória através do argumento 'Location'. Os argumentos 'Envelope' e 'Average' estabelecem o número de vezes que a onda é envolvida e feita a média, respetivamente. A envolvente de um sinal contorna os seus extremos de uma forma suave, segundo [25].

Na Figura 4.8 é possível ver a sintaxe do comando enviado para o instrumento.

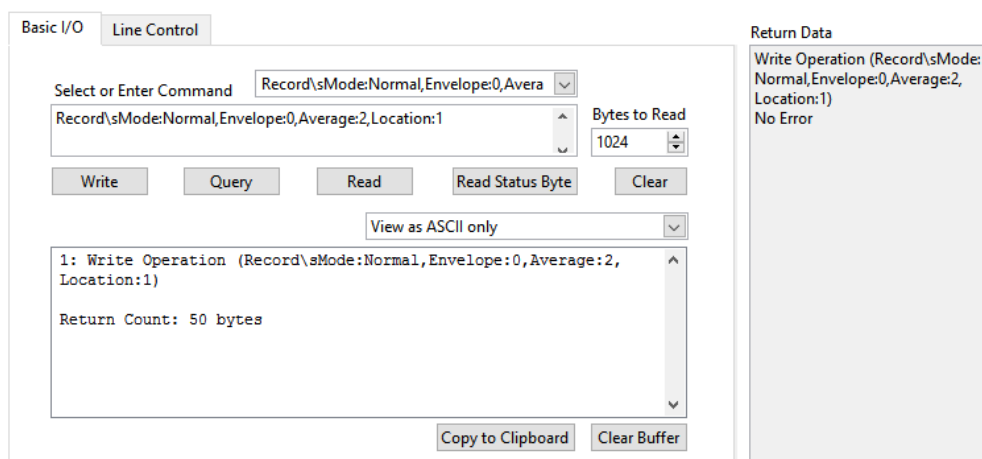


Figura 4.8: Configuração do registo de dados

A fim de atestar, uma vez mais, se o digitalizador foi configurado corretamente, recorreu-se ao comando 'Record?' que transmite quais os parâmetros do registo de dados, clicando no botão **Query**. A Figura 4.9 mostra a janela de resposta do comando em causa.

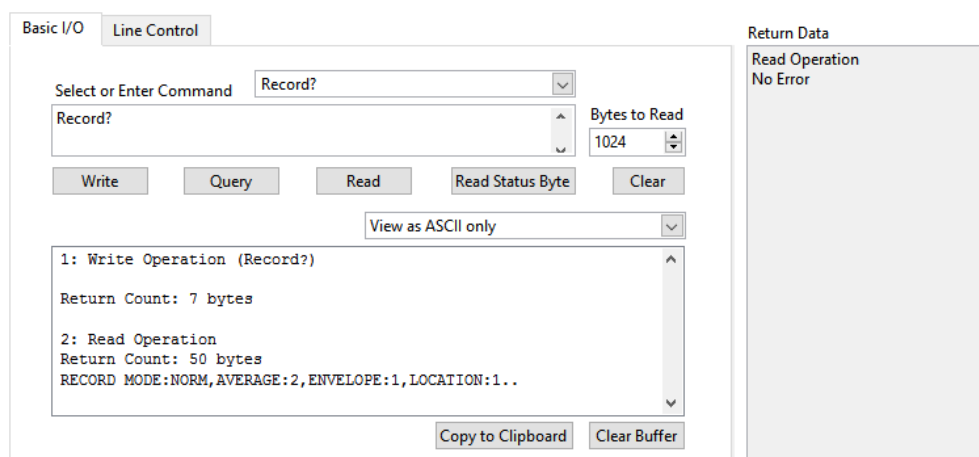


Figura 4.9: Query do comando 'Record'

Neste caso a resposta do digitalizador foi 'RECORD MODE:NORM,AVERAGE:2, ENVELOPE:1,LOCATION:1', como esperado, já que o registo dos dados foi programado para o modo normal, definido para fazer duas vezes a média e uma vez a envolvente do sinal.

O comando 'Data', pertencente ao grupo *Waveform Transfer Group*, serve para mudar as configurações dos dados. Entre outros, seleciona qual o canal de memória para onde são transferidos os dados (argumento 'Channel'), atribui uma posição na memória para o canal escolhido (argumento 'Location') e estabelece o endereço de memória inicial em que os dados são enviados e recebidos (argumento 'Start'). Adicionalmente, estabelece o número de pontos a serem transferidos (argumento 'Count'), o formato do bloco da transmissão dos dados (argumento 'Bformat') e o tamanho do bloco de dados caso se use o formato binário (argumento 'Bsize').

Na Figura 4.10 está exposta a janela que mostra a configuração do comando ‘Data’ enviado para o instrumento.

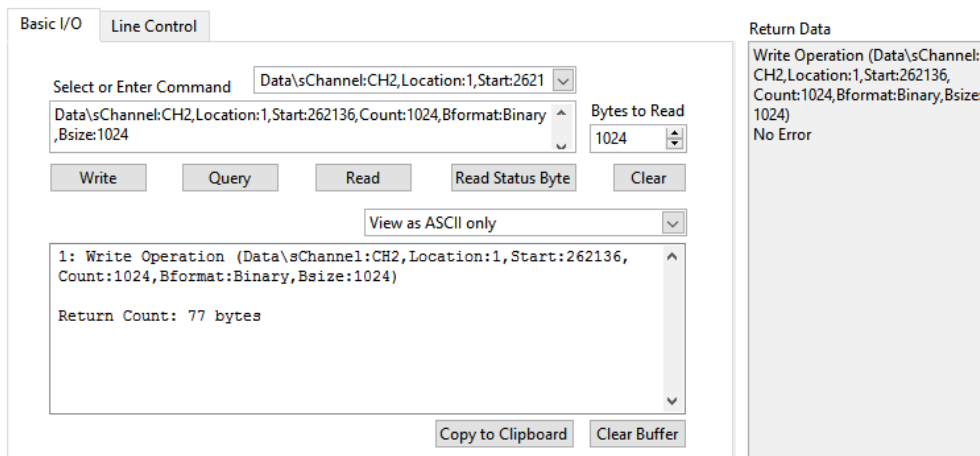


Figura 4.10: Configuração dos dados

De modo a assegurar que o instrumento leu corretamente as instruções enviadas usa-se o comando ‘Data?’ que reporta as configurações escolhidas para os dados, pressionando o botão **Query**. Na Figura 4.11 apresenta-se a janela de resposta para este comando.

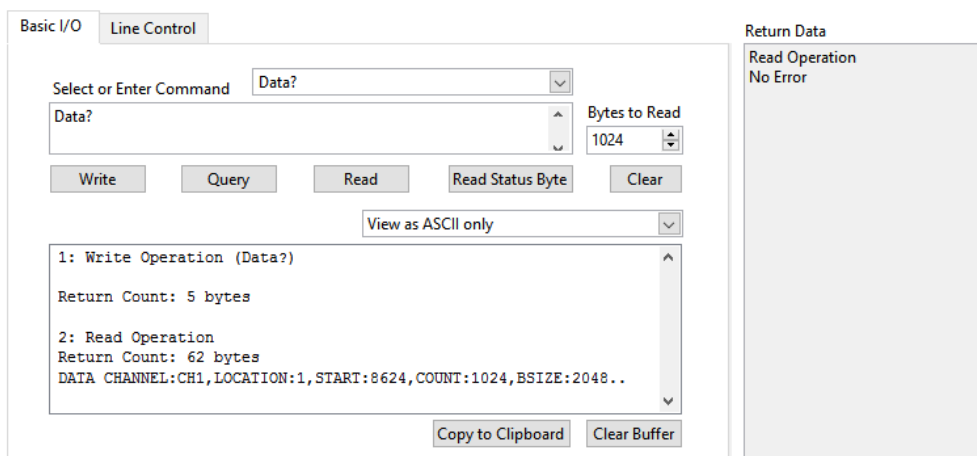


Figura 4.11: Query do comando ‘Data’

Para o comando ‘Data?’ a resposta do digitalizador foi ‘DATA CHANNEL:CH1, LOCATION:1,START:8624,COUNT:1024,BSIZE:2048’. O código resultante do comando enviado está conforme o que era esperado, exceto no caso do endereço de memória inicial em que os dados são enviados e recebidos e do tamanho do bloco de dados, por limitações intrínsecas do equipamento.

Por último, foi utilizado o comando ‘Set?’, que devolve as configurações atuais do instrumento, clicando no botão **Query**. O código resultante pode ser usado para configurar o instrumento de acordo com as preferências do utilizador. A Figura 4.12 mostra a janela de resposta do digitalizador RTD710A para as configurações atuais.

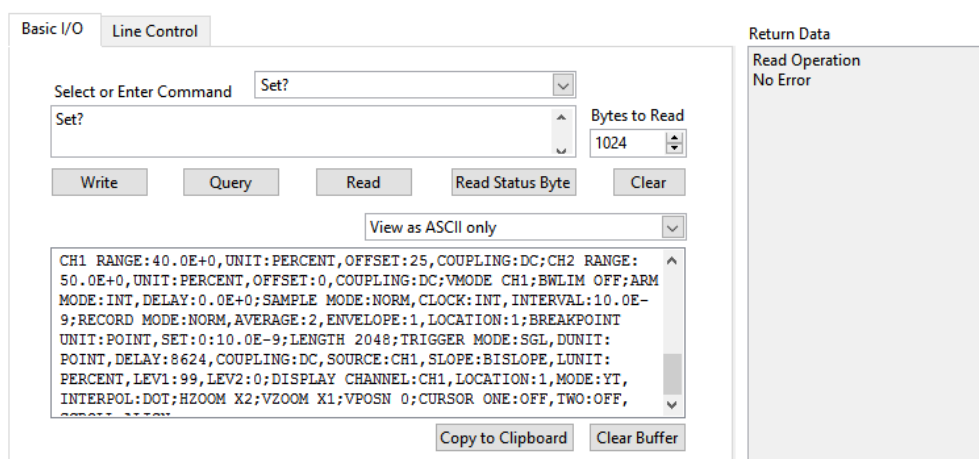


Figura 4.12: Query do comando 'Set'

Como é perceptível na Figura 4.12, o comando 'Set?' permite visualizar as configurações gerais do instrumento, o que possibilita confirmar se os comandos usados para configurar individualmente cada função tiveram o resultado esperado. Além dos comandos enviados para o digitalizador, este comando devolve outras funções com um valor predefinido, mesmo que não tenham sido programadas. Assim, é possível ter uma visão geral sobre o instrumento e a programação atual das funções.

Foi alcançado neste capítulo o objetivo inicialmente proposto de comunicar com o digitalizador e conseguir programá-lo de acordo com a sua finalidade. No entanto, esta linguagem e a forma como decorre o processo de comunicação não o torna intuitivo para o utilizador. Sendo assim, foi adaptada uma interface gráfica para facilitar este processo, que está explicada na secção 4.3.

4.3 Interface com o Utilizador

Nesta secção pretende-se introduzir uma interface de comunicação que permita ao utilizador manusear o instrumento de uma forma mais intuitiva. Para tal recorreu-se à biblioteca de *LabVIEW* produzida pela *Tektronix* e disponibilizada pela *National Instruments* [26]. A interface foi então adaptada consoante o objetivo de cada função para o projeto final. Para o bom funcionamento da biblioteca é fundamental instalar o programa NI-VISA e ainda as *drivers* próprias do dispositivo de controlo, neste caso NI-488.2. Antes de utilizar cada janela de interface da biblioteca de *LabVIEW* é necessário seguir os procedimentos de reconhecimento do dispositivo de controlo e do instrumento descritos na secção 4.1.

Na Figura 4.13 é apresentada a janela de interface usada para inicializar o instrumento e perceber se a conexão foi bem sucedida e o comando enviado bem interpretado.

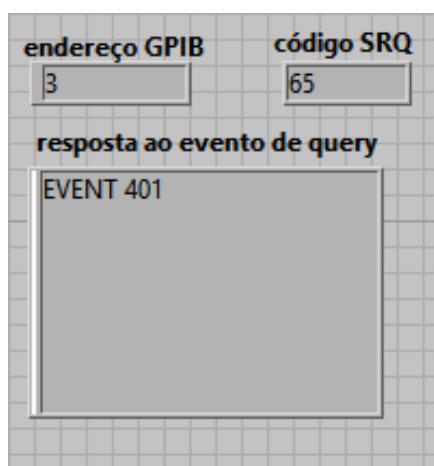


Figura 4.13: Janela de interface para inicialização do instrumento

Após ser introduzido o endereço GPIB correspondente ao instrumento e se correr o programa, o código *Service Request* (SRQ) devolvido foi '65' e a resposta ao evento foi 'EVENT 401'.

Os códigos de evento e SRQ respeitantes ao instrumento RTD 710A podem ser consultados na secção 5 (*SRQ and Event Codes*) do seu guia de interface, disponível em [10]. Neste caso, o código de evento 401 e o código SRQ 65 significam que o sistema está ligado e que o byte de estado não está ocupado, ou seja, não está em nenhuma operação de leitura.

Na Figura 4.14 é possível ver a janela de interface para uma comunicação avançada, por meio de comandos enviados para o instrumento. A finalidade deste painel frontal consiste em inicializar e calibrar o instrumento, mudar as definições de controlo, capturar uma forma de onda ou transferir formas de onda para o instrumento, e do instrumento para o controlador, tal como acontecia com o painel de teste do NI-VISA, descrito na secção 4.2.

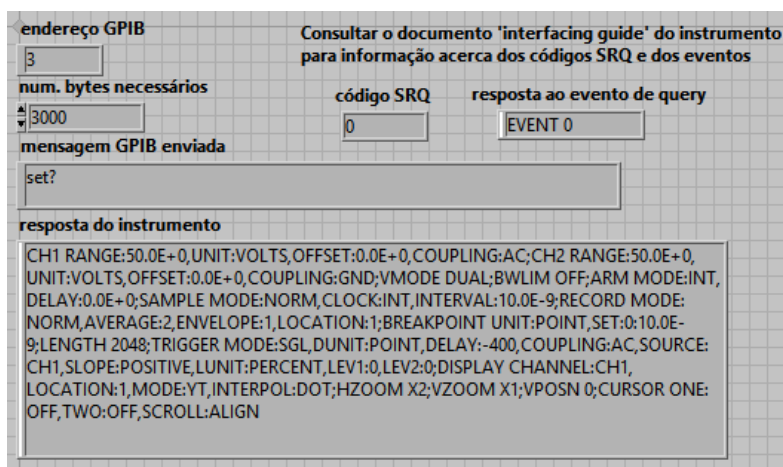


Figura 4.14: Janela de interface para comunicação avançada com o instrumento

Foi enviado o comando 'Set?', que devolve as configurações atuais do instrumento, e os códigos de evento e SRQ recebidos foram, respectivamente, 'EVENT 0' e '0'. O código SRQ significa que não há qualquer estado a reportar e que o byte de estado não está ocupado. Quanto ao código de evento, não tem qualquer significado, visto que não engloba nenhum dos códigos presentes em [10], incluindo os códigos de erro. Apesar disso, a resposta do instrumento está conforme o previsto, dando acesso às configurações vigentes do instrumento.

Na janela de interface para configuração do modo vertical pode ser selecionado o modo de aquisição (duplo canal, apenas canal 1 ou alta velocidade). Se for escolhido o modo de alta velocidade, o modo de aquisição muda automaticamente para 'CH 1 Only'. Pode-se ainda indicar qual a gama de entrada e o tipo de acoplamento, ou seja, a forma como é conectado cada um dos canais de entrada. O acoplamento AC faz com que o sinal de entrada seja acoplado capacitivamente ao amplificador de entrada, o que faz com que as componentes DC desse sinal sejam filtradas. A opção GND referencia a entrada do amplificador de entrada à terra. O modo de acoplamento DC significa que todas as componentes da frequência do sinal de entrada são acopladas ao amplificador de entrada, logo ambas as componentes, DC e AC, são medidas. Por último, pode-se definir o limite de largura de banda. Caso se ative esta opção, o limite de largura de banda do amplificador de entrada é estabelecido a 20 MHz. Se esta opção estiver desligada, o limite da largura de banda corresponde a 100 MHz, de acordo com [8]. Na Figura 4.15 é exibida a janela de interface para a configuração do modo vertical do instrumento.

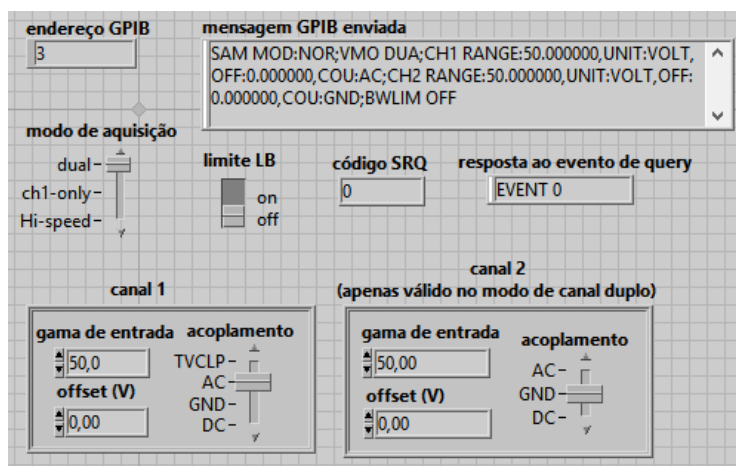


Figura 4.15: Janela de interface para configuração do modo vertical

Depois de introduzido o endereço GPIB respeitante ao instrumento e selecionadas as opções para configurar o modo vertical do digitalizador os códigos de evento e SRQ recebidos foram, respectivamente, 'EVENT 0' e '0', tal como na janela de interface da Figura 4.14. O significado destes códigos já foi explicado e apesar de não trazer informações relevantes, o painel frontal do instrumento indica que foi corretamente configurado, de acordo com as opções escolhidas. É ainda possível visualizar a mensagem GPIB enviada,

com os comandos que foram selecionados.

Na janela de interface para a configuração do modo de aquisição dos dados pode-se indicar o modo de registo dos dados, qual o intervalo de amostragem, a duração do registo e a sua localização na memória.

- Há quatro modos de registo dos dados. No modo normal, os dados da onda são adquiridos para a posição de memória escolhida que pode ser consultada selecionando o botão 'record location' do painel frontal. No modo *averaging* (AVE) é feita a média, de forma contínua, dos dados da onda digitalizada. No modo *auto-advance* (ADV) a aquisição dos dados da onda começa na primeira posição da memória e avança progressivamente até à posição definida pelo botão 'record location'. No último modo de registo, chamado *envelope* (ENV), a onda digitalizada é continuamente envolvida. O número de vezes que a onda é envolvida ou que é feita a média dos dados da onda pode ser estabelecido na caixa de texto com o nome 'relação AVG/ENV', consoante se escolha um ou outro modo de registo [8].
- O intervalo de amostragem pode ser variado entre 10 ns e 200 ms na sequência 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, sendo que no modo de alta-velocidade o intervalo de amostragem pode tomar o valor mínimo de 5 ns [8].
- Os valores para o tamanho do registo de dados podem variar entre 1024 e 131072 palavras quando o modo vertical estiver em duplo canal ou entre 1024 e 262144 palavras se estiver definido apenas para o canal 1. Se o tamanho do registo for mudado durante uma aquisição de dados, o instrumento interrompe a aquisição e entra no modo de espera [8].
- O valor máximo para a posição de memória é 128 quando o modo vertical está em duplo canal e 256 quando apenas está ativo o canal 1. A Tabela 4.1, adaptada de [8], mostra a conjugação do tamanho do registo de dados com as posições de memória.

Tabela 4.1: Seleção do tamanho do registo

Tamanho do Registo	Modo Vertical	
	Duplo	Canal 1
1024	128	256
2048	64	128
4096	32	64
8192	16	32
16384	8	16
32768	4	8
65536	2	4
131072	1	2
262144	-	1

Se ao aumentar o tamanho do registo de dados for necessário um aumento do número da localização maior que o máximo da localização do registo na memória, a posição de registo é automaticamente reposta para o máximo valor permitido, de acordo com [8].

Nesta janela de interface pode também ser selecionado o modo de aquisição (duplo canal, apenas canal 1 ou alta velocidade) e se os dados estão em modo de espera (*hold state*). Se este modo estiver ligado, significa que a última captura terminou e mais nenhuma pode ocorrer até que seja feito *reset*. Ao pressionar o *reset* pode começar uma nova captura com o próximo evento de disparo válido. Na Figura 4.16 é apresentada a janela de interface para a configuração do modo de aquisição do instrumento.

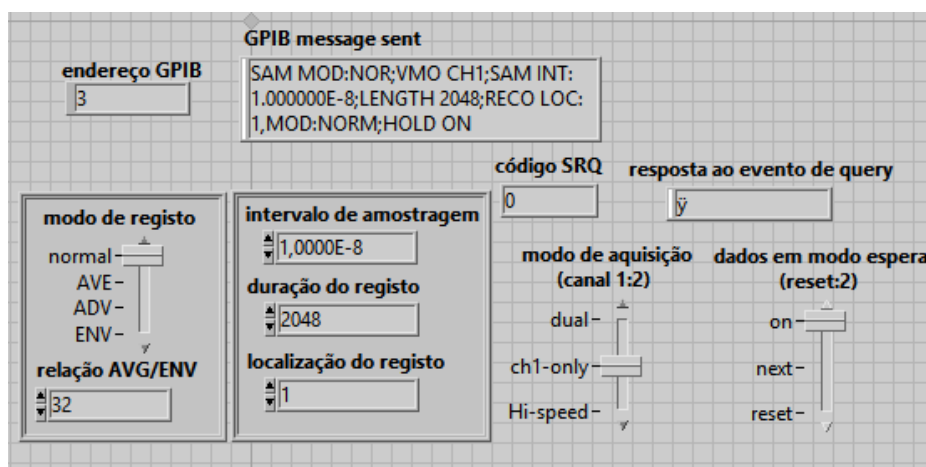


Figura 4.16: Janela de interface para configuração do modo de aquisição dos dados

Em primeiro lugar, para garantir que a comunicação é bem sucedida, introduz-se o endereço GPIB respeitante ao instrumento. De seguida, seleccionam-se as opções para configurar o modo de aquisição do digitalizador. Por último, ao correr o programa, constata-se que os códigos de evento e SRQ recebidos foram, respetivamente, 'y' e '0'. O significado do código SRQ já foi explicado anteriormente, e o código de evento 'y', onde y é a identificação do digitalizador, não transmite qualquer informação acerca da forma como o instrumento recebeu os comandos. Independentemente destes códigos não trazerem informações relevantes, o painel frontal do instrumento foi corretamente configurado, de acordo com as opções escolhidas. É ainda possível visualizar a mensagem GPIB enviada, com os comandos enviados a corresponderem aos comandos que foram selecionados.

Na janela de interface para a configuração do modo de disparo é possível configurar a sua origem, o declive do sinal de disparo, o modo de disparo e o seu acoplamento, o seu atraso e os dois níveis de disparo disponíveis.

- A origem do sinal de disparo pode ser interna ou externa. Quando é escolhida a fonte externa, o sinal disponibilizado à ligação 'EXT TRIG IN', situada no painel frontal do instrumento, torna-se a origem do sinal de disparo. Caso seja selecionada

a fonte interna, a origem do sinal de disparo pode alternar entre a entrada do canal 1 e a entrada do canal 2, conforme pretendido [8].

- O declive do sinal de disparo pode ser variado entre as seguintes opções: + (valor por defeito), –, BI (\pm), + HYS e – HYS. O declive ‘+’ gera um impulso de disparo quando a parte positiva do sinal de disparo cruza o nível indicado em ‘nível de trig 1’ ou configurado pela tecla do painel frontal ‘TRIG LEVEL 1’. O declive ‘–’ gera um impulso de disparo quando a parte negativa do sinal de disparo cruza o nível indicado em ‘nível de trig 1’ ou configurado pela tecla do painel frontal ‘TRIG LEVEL 1’. O declive ‘BI (\pm)’ produz um impulso de disparo quando a parte positiva do sinal de disparo cruza o nível indicado em ‘nível de trig 1’ ou quando a parte negativa desse mesmo sinal cruza o nível indicado em ‘nível de trig 2’. O declive ‘+ HYS’ produz um impulso de disparo quando a parte positiva do sinal de disparo cruza o nível indicado em ‘nível de trig 1’. O próximo sinal de disparo não é aceite até que a parte negativa desse sinal cruze o nível indicado em ‘nível de trig 2’, causando a reinicialização do circuito de disparo. O declive ‘– HYS’, contrariamente ao anterior, gera um impulso de disparo quando a parte negativa do sinal de disparo cruza o nível indicado em ‘nível de trig 2’. O próximo sinal de disparo não é aceite até que a parte positiva desse sinal cruze o nível indicado em ‘nível de trig 1’, provocando assim a reinicialização do circuito de disparo [8].
- Há 5 modos de operação para o circuito de disparo. No modo ‘AUTO’ a gravação é livre, na ausência de um sinal de disparo. Permite a captura de sinais com frequências superiores a aproximadamente 50 Hz. No modo ‘NORM’ a gravação é iniciada no evento de disparo depois de ter ocorrido o evento de armar o disparo. No modo ‘SGL’ a gravação começa quando ocorre o disparo. Depois de terminada, o instrumento entra no modo de espera e exibe a onda adquirida. Não pode ser feita uma nova gravação até que o registo do instrumento seja reinicializado, pressionando o botão ‘RESET/HOLD’ do painel frontal ou através do envio do comando *reset* via GPIB. No modo ‘COMP IN’ a gravação é contínua, usando o modo de disparo NORM, até que todas as formas de onda capturadas estejam dentro da gama determinada pela forma de onda de referência. Os dados da forma de onda de referência devem estar envolvidos. No modo ‘COMP OUT’ a gravação é igualmente contínua, usando o modo de disparo NORM, até que parte da forma de onda capturada esteja fora da gama determinada pela forma de onda de referência. Neste caso os dados da forma de onda de referência devem também estar envolvidos, segundo [8].
- Existem diversos métodos usados para acoplar o sinal de disparo ao circuito gerador do disparo. Tendo em conta o instrumento em uso, apenas serão abordados os primeiros 4 modos visíveis na Figura 4.17. No modo de acoplamento ‘DC’, são acopladas todas as componentes da frequência do sinal de disparo ao circuito gerador do disparo. No modo de acoplamento ‘HF REJ’ as componentes de alta frequência

do sinal de disparo acima de 50 Hz são atenuadas. No modo de acoplamento 'LF REJ' as componentes de baixa frequência do sinal de disparo inferiores a 50 Hz são atenuadas e é bloqueada a componente DC desse mesmo sinal. No modo de acoplamento 'AC' as componentes do sinal de disparo inferiores a 60 Hz são atenuadas e é bloqueada a sua componente DC, de acordo com [8].

Nesta janela de interface pode ainda ser indicado qual o atraso do disparo em número de pontos. O valor por defeito é -400, onde o sinal negativo significa que a gravação ocorre em modo de pré-disparo¹. Além disto, também se podem definir os níveis de disparo em percentagem. Quando a origem do disparo provém de um sinal interno, o visor mostra o nível de disparo em percentagem da gama de valores de entrada do canal seleccionado. Na Figura 4.17 é exibida a janela de interface para a configuração do modo de disparo.

Figura 4.17: Janela de interface para configuração do modo de disparo

Depois de introduzir o endereço GPIB respeitante ao instrumento e de ajustar as funções de acordo com as pretensões do utilizador corre-se o programa para que o digitalizador fique configurado. Depois de correr o programa, verifica-se que os códigos de evento e SRQ recebidos foram, respetivamente, 'y' e '0'. Analogamente à janela de interface mostrada na Figura 4.16 estes códigos não transmitem nenhum tipo de informação quanto ao sucesso da comunicação efetuada. Apesar disso, o instrumento foi devidamente configurado conforme se comprova pela mensagem GPIB enviada e pelos *Light Emitting Diode* (LED) que foram ligados no painel frontal, de acordo com as opções escolhidas na janela de interface.

Na última janela de interface é possível visualizar as formas de onda capturadas pelo equipamento, após a introdução do endereço GPIB correspondente ao digitalizador, da posição de memória onde foi guardada a gravação e através da escolha do canal respetivo. Esta janela de interface permite ainda ter acesso a algumas informações acerca das medições, tais como o centro da onda de tensão de impulso, os níveis de tensão superior,

¹No modo de aquisição pré-disparo o utilizador pode ver o sinal antes do evento de disparo ocorrer.

inferior e intermédio, as unidades de medida (em percentagem ou absolutas), a duração do tempo de subida, a duração do impulso e a sua amplitude.

Na Figura 4.18 está presente a janela de interface para visualização da forma de onda obtida e dos parâmetros acima mencionados.

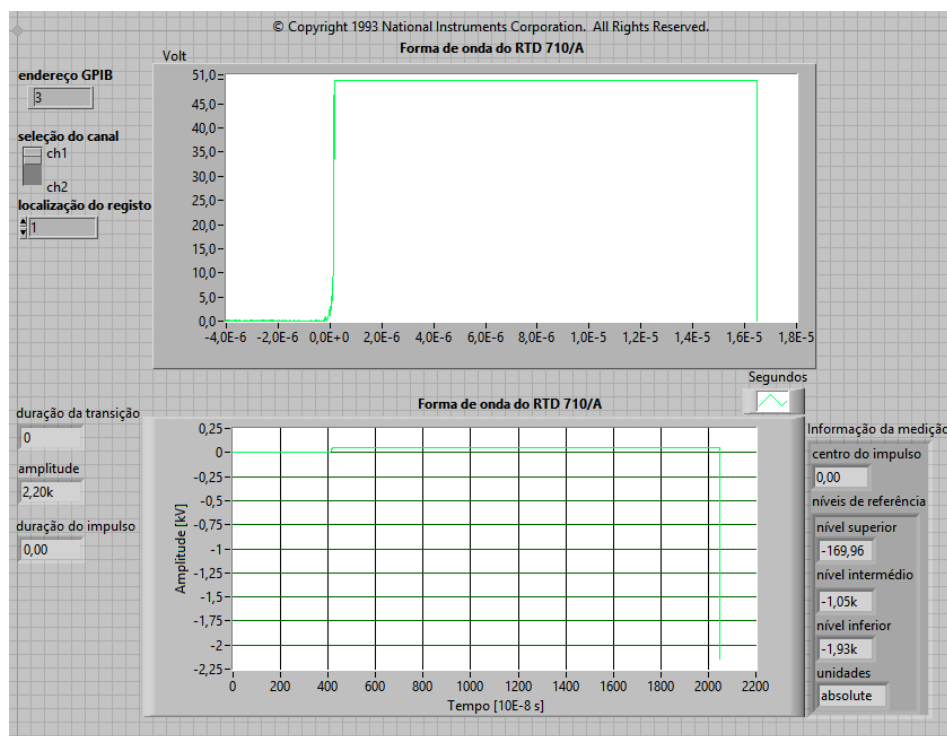


Figura 4.18: Janela de interface para visualização das formas de onda

Ao correr o programa mostrado na Figura 4.18, obtêm-se resultados que ficam aquém do esperado. Em ambos os gráficos está representada a mesma forma de onda, sendo que no gráfico de cima, que não apresenta linhas de grelha, foi feita uma aproximação para possibilitar uma melhor visualização da forma de onda obtida. Como é possível constatar pela Figura 4.18, a forma de onda resultante tem um aspeto pouco limpo, com alguma distorção, e satura aos 50 V. É ainda visível, no gráfico de baixo, um pico enorme de tensão (negativo), tendo em conta o resto do sinal. Nestes gráficos é impossível determinar o tempo de subida ou mesmo se é de facto uma onda de tensão de um impulso atmosférico, como era pretendido.

Depois de vários testes os resultados não variaram, o que leva a crer que o digitalizador está com uma avaria na leitura ou na gravação das formas de onda. Posteriormente, foi confirmado pelo Engenheiro Rui Martins, pertencente à Energias de Portugal (EDP) Labelec (empresa que gentilmente forneceu o digitalizador à faculdade), que o equipamento em questão estava com uma avaria e não estava a ser usado no laboratório.

Para garantir que o funcionamento do digitalizador estava anormal no que diz respeito à leitura das formas de onda aplicou-se uma senoide à entrada do mesmo, produzida

por um gerador de sinais. O resultado está representado na Figura 4.19.

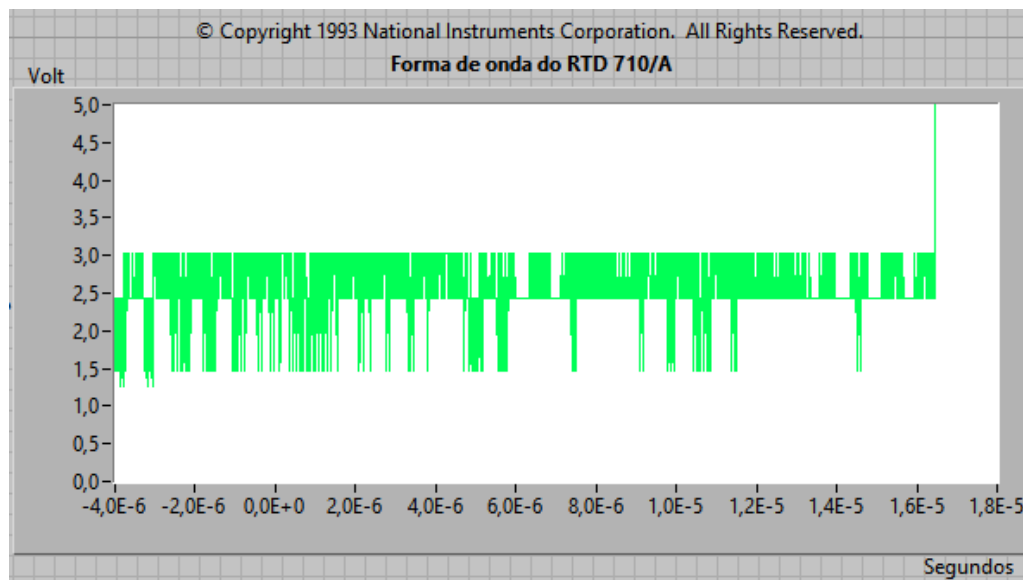


Figura 4.19: Forma de onda resultante da aplicação de uma senoide ao digitalizador

Como se pode verificar pela Figura 4.19, a forma de onda não se parece com uma senoide, apresenta muita distorção e o mesmo pico de tensão que apresentava na Figura 4.18, no final do registo. Com isto, confirma-se a possível avaria do instrumento no registo dos dados ou na apresentação das ondas.

ENSAIOS E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo são apresentados os ensaios feitas no sistema e os resultados experimentais obtidos. Numa primeira fase testa-se a capacidade do sistema gerar tensões de impulso normalizadas de $1,2/50\mu s$. De seguida junta-se o objeto a ensaiar ao sistema e avalia-se o seu desempenho perante a aplicação destas tensões, no que toca à determinação da tensão de disrupção e da característica tensão-tempo do isolador.

5.1 Tensões de Impulso *Standard*

Para testar se o sistema de geração e medição de tensões de impulso realmente está a gerar tensões de impulso normalizadas utilizou-se as configurações mostradas nas Figuras 3.2 e 3.3. Dada a impossibilidade de reproduzir as formas de onda através do digitalizador, recorreu-se a um osciloscópio digital da *Tektronix*. Para a ligação entre o osciloscópio e o voltímetro de impulsos, que tem a designação HV 9152, foi usado um cabo coaxial RG-58 de 50Ω com fichas BNC macho em ambas as extremidades.

Dados que as tensões de ensaio são na ordem dos kV, o circuito atenuador do osciloscópio foi definido para reduzir a amplitude do sinal por um fator de 1000, o máximo permitido, para garantir que é possível a visualização das formas de onda.

A Figura 5.1, adaptada de [1] mostra a forma da onda de tensão de um impulso atmosférico, que será o mais próxima possível da onda de tensão aplicada ao equipamento a ensaiar. Apesar de estar bem indicado no desenho, convém salientar que a origem virtual O_1 é definida como o instante onde a reta que contém os pontos A e B cruza o eixo do tempo. A caracterização deste tipo de ondas de tensão pode ser feita tendo em conta a sua amplitude, os tempos virtuais de frente e de cauda e eventualmente o tempo até à disrupção, caso o objeto ensaiado não suporte a aplicação da tensão de impulso.

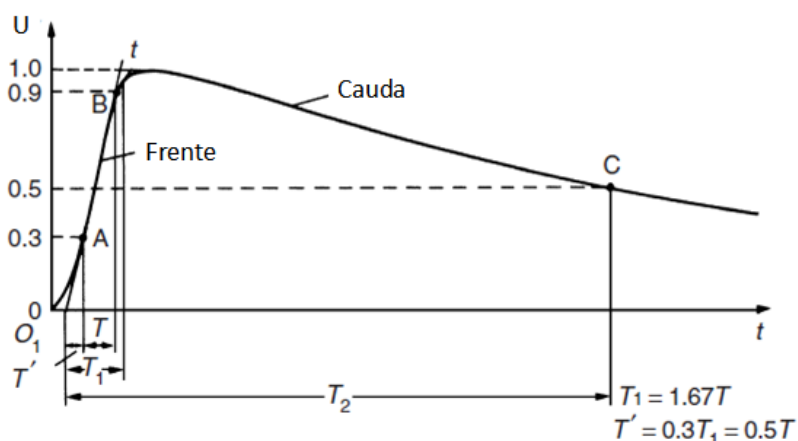


Figura 5.1: Características da onda de tensão de um impulso atmosférico

O tempo de frente de onda T_1 , novamente um parâmetro virtual já apresentado na secção 2.1.1, é definido como 1,67 vezes o intervalo de tempo T compreendido entre os instantes em que a tensão do impulso corresponde a 30 % e 90 % (pontos A e B da Figura 5.1, respetivamente) do seu valor de pico, de acordo com [1]. Analogamente, o tempo de meia amplitude de onda ou tempo de cauda é definido pelo intervalo de tempo compreendido entre a origem virtual O_1 e o instante em que a tensão do impulso tenha decrescido até 50 % do seu valor de pico (ponto C na Figura 5.1).

A Figura 5.2 mostra a onda de tensão obtida experimentalmente depois de aplicar uma tensão ao primário do transformador de ensaio correspondente a 29,1 V. O valor da tensão no secundário do transformador de ensaio calcula-se recorrendo à equação 3.1, que resulta numa tensão de ensaio de aproximadamente 18,7 kV. O valor medido no voltímetro de impulsos foi de 11,24 kV, que corresponde a uma diminuição da tensão de aproximadamente 40 % em relação à tensão aplicada.

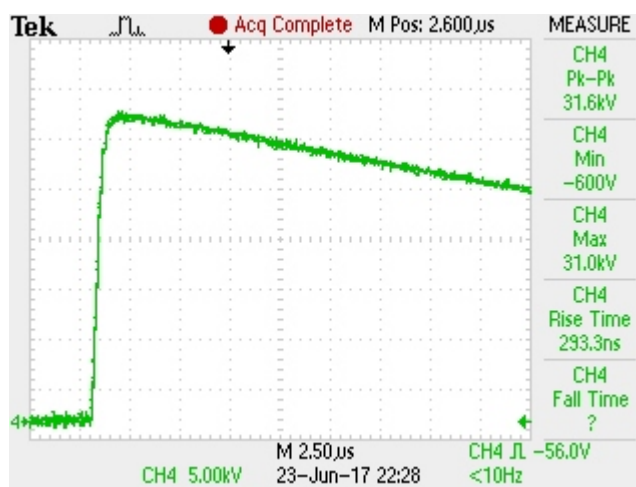


Figura 5.2: Onda de tensão de um impulso atmosférico obtida experimentalmente

Comparando a Figura 5.1 com a Figura 5.2, percebe-se que a forma de onda obtida experimentalmente é semelhante à forma de onda da tensão de impulso atmosférico. Note-se que nesta fase ainda não foi adicionado ao circuito de ensaio o objeto a ensaiar, ou seja, a cadeira de isoladores.

Quanto à amplitude que está apresentada na Figura 5.2, não tem qualquer significado prático, apenas serve para fazer as medições dos tempos de frente e de meia amplitude, visto que o valor da tensão de pico medida não corresponde ao valor de tensão de pico aplicada nem ao valor apresentado pelo voltímetro de impulsos. O valor da tensão pico-a-pico mostrado no osciloscópio corresponde a 31,6 kV fruto da atenuação selecionada de 1000 vezes, caso contrário o valor seria 31,6 V. Definiu-se este valor de atenuação de forma a que os cálculos e a visualização das ondas sejam mais intuitivos, com valores próximos dos reais, na ordem dos kV. O valor da tensão pico-a-pico real pode ser determinado através da tensão aplicada em baixa tensão (mostrada no multímetro da mesa de controlo), como indicado na equação 3.1 presente na secção 3.2.

Para medir o tempo de frente de onda, onde é necessário saber os instantes de tempo em que a tensão de impulso corresponde a 30 % (T_{30}) e a 90 % (T_{90}) do seu valor de pico, recorreu-se à função *cursor* do osciloscópio. A Figura 5.3 mostra o resultado da introdução de dois cursores de tempo para obtenção dos parâmetros já referidos.

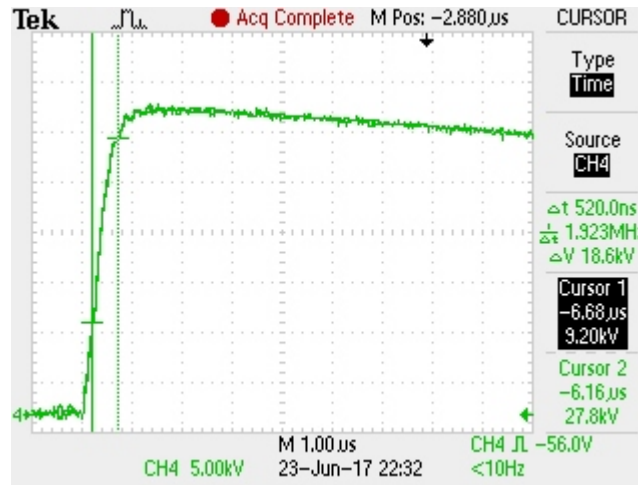


Figura 5.3: Obtenção dos parâmetros temporais T_{30} e T_{90} da tensão de impulso atmosférico

O parâmetro Δt , calculado pelo osciloscópio e visível na Figura 5.3, devolve a diferença entre os instantes de tempo T_{30} e T_{90} . De acordo com [1] e como indicado na Figura 5.1, o tempo de frente T_1 calcula-se pelo produto da constante 1,67 pelo valor da diferença absoluta entre os cursores, Δt , obtendo-se assim a equação 5.1.

$$T_1 = 1,67 \cdot \Delta t \approx 0,87 \mu s \quad (5.1)$$

Como já foi abordado na secção 2.1.1, o tempo virtual de frente T_1 padronizado para os

ensaios de alta tensão, no que diz respeito a tensões de impulsos atmosféricos, apresenta o valor de $1,2 \mu s$, com tolerância de 30 %. Então, os valores aceites para este tipo de impulsos situam-se na gama $[0,84; 1,56] \mu s$.

O tempo virtual de frente obtido pela equação 5.1 está dentro da gama de valores mencionada, pelo que a onda de tensão de impulso atmosférico gerada está de acordo com os padrões, no que diz respeito ao tempo de frente de onda.

O tempo virtual de cauda é definido pelo intervalo de tempo entre a origem virtual O_1 e o instante em que a tensão de impulso decresce até 50 % do seu valor de pico, de acordo com [1] e como mostra a Figura 5.1. Como o valor de O_1 é desconhecido, é utilizada a equação linear da reta, que passa pelos pontos T_{30} e T_{90} , para o estabelecer. A equação 5.2 representa a reta acima mencionada, onde U simboliza o eixo das ordenadas e t o eixo das abcissas.

$$U = mt + b \quad (5.2)$$

Considerando os pontos definidos pelos cursores representados na Figura 5.3, o declive m da reta é dado pela equação 5.3.

$$m = \frac{27,8 - 9,2}{-6,16 - (-6,68)} \approx 35,77 \quad (5.3)$$

Substituindo o ponto respeitante ao cursor 1 na equação 5.2, vem:

$$9,2 = 35,77 \cdot (-6,68) + b \iff b \approx 248,14 \quad (5.4)$$

O valor de O_1 , que corresponde ao instante t em que $U = 0$, é deduzido da equação 5.2:

$$O_1 = t_0 = -\frac{b}{m} \approx -6,9 \mu s \quad (5.5)$$

Com o valor da origem virtual definido já é possível calcular o tempo virtual de cauda ou tempo de meia amplitude da onda. A Figura 5.4 mostra a aplicação de dois cursores de tempo para a obtenção do tempo de cauda T_2 .

Como é visível na Figura 5.4, o cursor 1 foi colocado no valor mais próximo possível da origem virtual O_1 calculada e o cursor 2 no instante em que a tensão na cauda da onda equivale a 50 % do valor de pico. Daqui resulta um valor de Δt , calculado pela diferença temporal entre os dois cursores, que neste caso corresponde diretamente ao valor do tempo virtual de cauda, como indica a equação 5.6.

$$T_2 = \Delta t \approx 47,8 \mu s \quad (5.6)$$

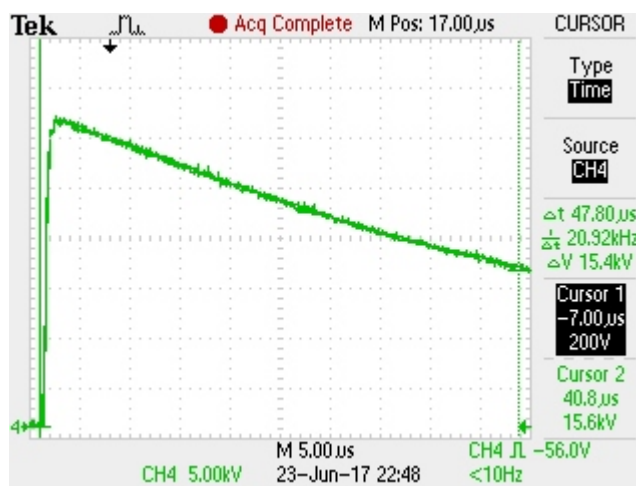


Figura 5.4: Obtenção do tempo virtual de cauda da tensão de impulso atmosférico

Como já foi referido na secção 2.1.1, o tempo virtual de cauda T_2 padronizado para os ensaios de alta tensão, no que diz respeito a tensões de impulsos atmosféricos, apresenta o valor de $50 \mu\text{s}$, com tolerância de 20 %. Sendo assim, os valores aceites para este tipo de impulsos situam-se na gama $[40; 60] \mu\text{s}$.

O tempo virtual de cauda, indicado na equação 5.6, pertence à gama de valores para os quais a onda gerada está de acordo com os padrões das ondas de tensão de impulso atmosférico, no que diz respeito ao tempo de cauda de onda.

Conclui-se que a onda de tensão gerada respeita as normas, no que toca aos tempos de frente e de cauda, podendo ser utilizada nos ensaios que simulam descargas atmosféricas.

Na Figura 5.5 está representada a onda de tensão obtida experimentalmente depois de aplicar uma tensão ao primário do transformador de ensaio correspondente a 48,4 V. O valor da tensão no secundário do transformador de ensaio, de acordo com a equação 3.1, é cerca de 31,1 kV. O valor medido no voltímetro de impulsos, para este caso, foi de 14,57 kV, correspondendo a uma diminuição da tensão de aproximadamente 53 % em relação à tensão aplicada.

Em relação à Figura 5.2, neste caso foi adicionado ao circuito um condensador de 10 nF em paralelo com o divisor de tensão capacitivo. Como descrito na secção 3.3, a adição deste condensador permite aumentar a capacidade do divisor de tensão, fazendo com que a tensão medida diminua, o que efetivamente acontece, comparando a diminuição de 40 % sem o condensador e a diminuição de 53 % com o condensador. Esta diminuição aumenta a possibilidade de visualização das formas de onda no osciloscópio, para tensões superiores, como é o caso da Figura 5.5.

A forma de onda obtida experimentalmente continua a ser semelhante à forma de onda da tensão de um impulso atmosférico, representada na Figura 5.1. Salienta-se que neste ensaio ainda não está presente no circuito o objeto a ensaiar.

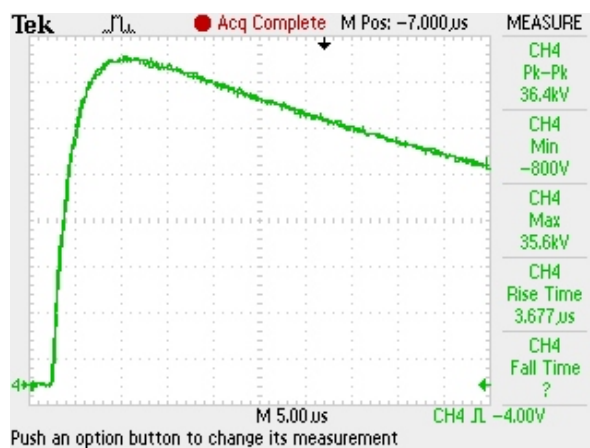


Figura 5.5: Onda de tensão de um impulso atmosférico obtida experimentalmente

Uma vez mais, a amplitude mostrada na Figura 5.5 não tem qualquer significado prático, apenas serve para fazer as medições dos tempos de frente e de meia amplitude, visto que o valor da tensão de pico medida não corresponde ao valor de tensão de pico aplicada nem ao valor apresentado pelo voltímetro de impulsos, embora esteja próximo do valor da tensão aplicada. O valor da tensão pico-a-pico mostrado no osciloscópio corresponde a 36,4 kV fruto da atenuação selecionada de 1000 vezes, caso contrário o valor seria 36,4 V.

Para caracterizar a onda obtida foram novamente calculados os tempos virtuais de frente e de cauda de onda. A forma como foram obtidos estes parâmetros é análoga à forma como foram obtidas para a onda da Figura 5.2. A Figura 5.6 mostra o resultado da introdução de dois cursores de tempo para obtenção do tempo de frente de onda.

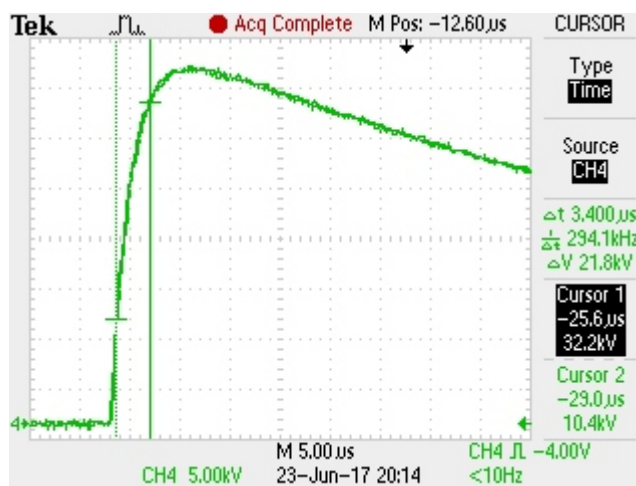


Figura 5.6: Obtenção dos parâmetros temporais T_{30} e T_{90} , com a inclusão de um condensador em paralelo com o circuito

O parâmetro Δt , calculado pelo osciloscópio e mostrado na Figura 5.6, devolve a diferença entre os instantes de tempo T_{30} e T_{90} . Analogamente ao caso anterior, o tempo

virtual de frente pode ser calculado como mostra a equação 5.7.

$$T_1 = 1,67 \cdot \Delta t \approx 5,68 \mu s \quad (5.7)$$

O tempo virtual de frente obtido pela equação 5.7 está fora da gama de valores permitida¹ para os ensaios com tipo de impulsos, pelo que a onda de tensão de impulso atmosférico gerada não está de acordo com os padrões, no que diz respeito ao tempo de frente de onda. Contudo, continua a ser considerada uma onda de tensão de impulso atmosférico, de acordo com [1], visto que o tempo de frente vale menos de uma dezena de microssegundos.

Para o cálculo do tempo virtual de cauda é necessário saber o valor da origem virtual O_1 e o instante em que a tensão de impulso decresce até 50 % do seu valor de pico, como já foi definido no caso anterior. Foi seguido o mesmo raciocínio usado para a onda de tensão do circuito sem o condensador adicional e de forma a descobrir o valor de O_1 recorreu-se à equação linear da reta, que passa pelos pontos T_{30} e T_{90} , representada na equação 5.2.

Considerando os pontos definidos pelos cursores representados na Figura 5.6 e os cálculos desenvolvidos no caso anterior, o declive m da reta dado pela equação 5.3 e o valor da ordenada na origem definido pela equação 5.4, usando o ponto respeitante ao cursor 2, são dados por:

$$\begin{cases} m \approx 6,41 \\ b \approx 196,29 \end{cases}$$

O valor de O_1 , que corresponde ao instante t em que $U = 0$, é deduzido da equação 5.2:

$$O_1 = t_0 = -\frac{b}{m} \approx -30,6 \mu s \quad (5.8)$$

Encontrado o valor da origem virtual pode-se calcular o tempo virtual de cauda ou tempo de meia amplitude da onda. A Figura 5.7 mostra a aplicação de dois cursores de tempo para a obtenção do tempo de cauda T_2 .

O cursor 1 foi colocado no valor mais próximo possível da origem virtual O_1 calculada e o cursor 2 no instante em que a tensão na cauda da onda equivale a 50 % do valor de pico. Daqui resulta um valor de Δt , que corresponde à diferença temporal entre os dois cursores, que neste caso condiz com o valor do tempo virtual de cauda, como indica a equação 5.9.

$$T_2 = \Delta t \approx 74 \mu s \quad (5.9)$$

¹Note-se que os valores aceites para o tempo de frente das ondas de tensão de impulsos atmosféricos situam-se na gama $[0,84; 1,56] \mu s$.

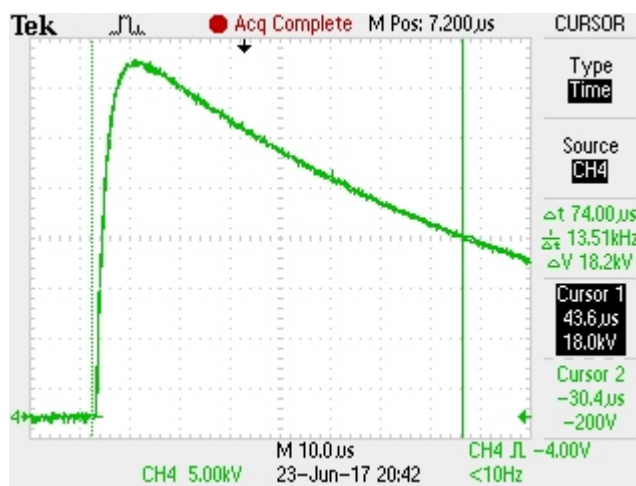


Figura 5.7: Obtenção do tempo virtual de cauda, com a inclusão de um condensador em paralelo com o circuito

O tempo virtual de cauda obtido pela equação 5.9 está fora da gama de valores permitida² para os ensaios com este tipo de impulsos, pelo que a onda de tensão de impulso atmosférico gerada não está de acordo com os padrões, no que diz respeito ao tempo de cauda de onda. No entanto, continua a ser considerada uma onda de tensão de impulso atmosférico, visto que o tempo de cauda está relativamente próximo do valor usado nos ensaios, considerando a tolerância, e bastante longe do valor padrão usado pelas ondas de tensão de impulsos de manobra ($2500 \mu s$).

Pela análise dos resultados com a inclusão do condensador em paralelo com o circuito, chega-se à conclusão que para os ensaios a melhor solução é retirar o condensador e usar o circuito original. Isto deve-se ao facto de no caso do circuito original, a onda gerada estar dentro dos padrões estabelecidos para os ensaios de alta tensão usando ondas de choque atmosférico.

²Note-se que os valores aceites para o tempo de cauda das ondas de tensão de impulsos atmosféricos situam-se na gama $[40; 60] \mu s$.

5.2 Determinação da Tensão de Contornamento U_{50} de uma Cadeia de Isoladores

O contornamento de uma cadeia de isoladores, segundo a referência [IEV 471-01-07], caracteriza-se como a descarga disruptiva³, externa aos isoladores e sobre a sua superfície, de ligação entre os pontos que normalmente têm aos seus terminais a tensão de serviço.

A tensão de contornamento ou tensão de disrupção U_{50} é definida como o valor de pico da tensão de choque que provoca o contornamento 50 % das vezes. A tensão U_{50} determina-se através de ensaios onde são aplicadas ondas de choque atmosférico à cadeia de isoladores em estudo e onde é medida a tensão que causa o escorvamento 50 % das vezes. Os ensaios são realizados utilizando o circuito descrito na secção 3.4 com a inclusão do objeto a ensaiar, a cadeia de isoladores, descrita na secção 3.5. Para este estudo foi usado o método *Up and Down*, descrito de seguida.

O método *Up and Down*, segundo [27], consiste na aplicação de sucessivos impulsos à cadeia de isoladores, aumentando ou diminuindo a tensão de impulso em relação à do impulso anterior, conforme o resultado obtido. A subida ou descida da tensão é feita por incrementos de ΔU , que se deve situar entre 1,5 e 3 % do valor estimado de U_{50} , de acordo com [27], e tem em conta os seguintes princípios.

- Se não houver contornamento da cadeia de isoladores, no impulso seguinte a tensão é aumentada de ΔU ;
- Se houver contornamento da cadeia de isoladores, no impulso seguinte a tensão é diminuída de ΔU .

Há dois procedimentos que podem ser adotados para o registo dos resultados. Pode-se começar com uma tensão baixa, que não provoque o contornamento da cadeia de isoladores, e vai-se aumentando a tensão progressivamente até que ocorra disrupção. Neste caso, todos os resultados até ao anterior àquele em que houve contornamento são rejeitados, e começa-se o registo a partir deste momento.

O outro procedimento, que foi adotado nos ensaios realizados, consiste em começar com uma tensão alta o suficiente para provocar o contornamento da cadeia de isoladores. A partir daqui, vai-se descendo progressivamente a tensão até que deixe de haver disrupção. Então, todos os resultados até ao anterior àquele em que não houve contornamento são rejeitados, e começa-se a fazer o registo a partir desse instante.

Após se ter obtido a tensão para a qual um incremento ou decrémento de ΔU altera o comportamento da cadeia de isoladores, começa o ciclo de subidas e descidas de modo progressivo, como já foi descrito anteriormente. O número mínimo de ensaios úteis, ou

³Passagem de um arco elétrico seguido de uma disrupção elétrica, ou seja, a mudança abrupta do meio isolador para meio condutor.

seja, que não contenha os ensaios rejeitados, deve ser 20, segundo [1]. Tendo em conta este pressuposto foram realizados 30 ensaios úteis. Considerando o facto de que a tensão é aumentada e diminuída sempre com o mesmo intervalo, as tensões aplicadas à cadeia de isoladores vão necessariamente situar-se nos mesmos patamares de tensão, afastados de ΔU . Para os ensaios terem credibilidade, é aconselhável que sejam aplicados entre 3 a 5 patamares de tensão, segundo [27].

O valor da tensão U_{50} corresponde à média aritmética das tensões de pico dos patamares respeitantes aos ensaios úteis. Então, o valor da tensão de contornamento U_{50} é definido pela equação 5.10, segundo [27].

$$U_{50} = \frac{\sum n_i \cdot \hat{U}_i}{M} \quad (5.10)$$

Onde:

- M corresponde ao número total de ensaios úteis;
- \hat{U}_i é o valor da tensão de pico no patamar i ;
- n_i coincide com o número de choques (havendo ou não contornamento) efetuados no patamar i .

A aplicação do método *Up and Down* está exemplificada na Tabela 5.1, onde ‘X’ significa que houve contornamento e ‘O’ significa que não houve contornamento. As duas colunas com fundo vermelho representam os ensaios que foram rejeitados até ao anterior àquele em que não houve contornamento, a partir do qual se contabilizam os ensaios úteis e onde efetivamente começa o estudo.

O valor de ΔU foi calculado a partir do valor de pico da tensão correspondente ao ensaio anterior àquele em que não houve contornamento. O valor obtido através da execução de ensaios prévios, fora do âmbito da experiência, foi de cerca de 3,3 kV que corresponde a 2,5 % de 133,3 kV. Como o incremento ou decrémento de ΔU é feito a partir da variação de tensão no autotransformador, esta vai ser aplicada ao primário do transformador de ensaio. Então ΔU tem de ser convertido para Volt, para saber o valor que tem de ser variado no autotransformador. Chegou-se à conclusão que a variação no primário do transformador de ensaio tem de ser cerca de 5,13 V. Como a variação da distância entre as esferas do disruptor é manual e a variação da tensão no autotransformador não pode ser especificada e é visualizada através de um voltímetro, não é uma variação muito precisa. Observando a Tabela 5.1 e visto que existem quatro patamares de tensão, foram efetivamente usados três valores de ΔU . Fazendo a média destes valores, obtém-se:

$$\Delta U = \frac{(140,5 - 136,9) + (136,9 - 133,3) + (133,3 - 129,5)}{3} \approx 3,67 \text{ kV} \quad (5.11)$$

Tabela 5.1: Determinação da tensão de contornamento U_{50} pelo método *Up and Down*

			M = 30 ensaios uteis																																
U_{pico} (kV)			1				5					10					15						20					25					30	Nº choques	$U_{pico} \cdot N^\circ$ choques (kV)
140,5	X										X					X	X				X						X						5	702,5	
136,9		X					X		O			X		O		O		X		O			X				O		X				X	11	1505,9
133,3			X		X		O		O				O						O					X		O				X		O		10	1333,0
129,5				O		O																			O							O		4	518,0

Com os 30 ensaios realizados e os dados recolhidos na Tabela 5.1 é possível calcular qual a tensão de contornamento U_{50} , através da equação 5.10.

$$U_{50} = \frac{702,5 + 1505,9 + 1333,0 + 518,0}{30} \approx 135,3 \text{ kV} \quad (5.12)$$

A partir da tensão de disrupção U_{50} pode ainda ser calculada a tensão de disrupção U_{10} . A tensão de disrupção U_{10} , analogamente à tensão U_{50} , define-se como o valor de pico da tensão de choque que provoca o contornamento do isolador 10 % das vezes e é calculada a partir da equação 5.13, segundo [1].

$$U_{10} = U_{50} \cdot 0,96 \approx 130 \text{ kV} \quad (5.13)$$

Como era de esperar, a tensão que provoca a disrupção do isolador 10 % das vezes é inferior à tensão que provoca a disrupção do isolador 50 % das vezes, como está provado nas equações 5.12 e 5.13.

Note-se que não foram calculados quaisquer fatores de correção para a densidade do ar e humidade, tendo em conta as condições atmosféricas padronizadas. Entendeu-se que as tensões de ensaio obtidas eram as tensões usadas para comparação com as tensões suportáveis pelo isolador, de modo a simplificar o ensaio e mantê-lo intuitivo e de rápida execução.

Tendo em consideração que o isolador a ensaiar é do tipo U70BS, descrito pormenorizadamente na secção 3.5, a tensão suportável à onda de choque atmosférico *standard*, a seco, independentemente da polaridade, corresponde a 100 kV, segundo o catálogo da fabricante russa de isoladores de vidro UMEK, disponível em [28].

As tensões indicadas no catálogo são as tensões suportáveis, ou seja, aquelas que o isolador tem de suportar sem perfurar ou sofrer qualquer disrupção. Então, a tensão de disrupção U_{50} terá de ser maior ou igual que 1,3 vezes os valores de tensão indicados⁴, para permitir ao fabricante ter alguma segurança no produto quando este é sujeito a ensaios. Considerando este pressuposto a tensão de disrupção para este isolador terá de ser sempre maior ou igual a 130 kV, o que de facto se verifica pelos ensaios realizados, visto que se obteve uma tensão de disrupção de aproximadamente 135,3 kV. Este resultado vai ao encontro do que era pretendido e permite concluir que o isolador está conforme, no que diz respeito à tensão suportável a ondas de choque atmosférico. Durante os ensaios verificou-se também que não houve perfuração do isolador, confirmando o bom funcionamento do mesmo e garantindo que pode continuar em utilização.

Fazendo uma análise crítica à experiência e analisando a Tabela 5.1, conclui-se que existem quatro patamares de tensão ao longo dos ensaios realizados. Este resultado está de acordo com o que foi dito no início da presente secção, que é aconselhável ter entre 3

⁴Indicação dada pelo Engenheiro Jorge Alves, pertencente à área de Testes e Ensaios da EDP Labelec.

5.2. DETERMINAÇÃO DA TENSÃO DE CONTORNAMENTO U_{50} DE UMA CADEIA DE ISOLADORES

a 5 patamares de tensão. Quanto ao valor de ΔU também foi dito no início da secção que se deve situar entre 1,5 e 3 % do valor estimado de U_{50} . Calculando a relação $\Delta U/U_{50}$, a partir dos valores obtidos nas equações 5.11 e 5.12, vem:

$$\frac{\Delta U}{U_{50}} = \frac{3,67}{135,3} \approx 2,7 \% \quad (5.14)$$

Conclui-se então que o intervalo ΔU foi bem escolhido, tendo em conta o resultado da equação 5.14 e que a tensão U_{50} foi obtida legitimamente, considerando o requisito anterior e o número de patamares dos ensaios.

Convém salientar que esta cadeia de isoladores não foi protegida por hastes de descarga, pelo que a disrupção, a acontecer, ocorre diretamente sobre a superfície dos isoladores. As Figuras 5.8 e 5.9 exemplificam o efeito da disrupção, onde se pode ver o contornamento do isolador numa extremidade e em extremidades opostas, respetivamente.

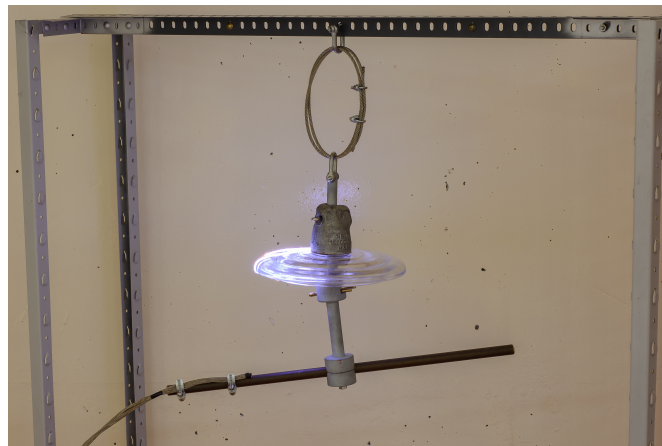


Figura 5.8: Efeito do contornamento do isolador

A Figura 5.9 permite ver o efeito da disrupção, com mais detalhe, a acontecer simultaneamente em extremidades opostas do isolador.



Figura 5.9: Efeito do contornamento do isolador em extremidades opostas

Neste tipo de isoladores, por serem feitos de vidro, a visualização de defeitos decorrentes da aplicação de ondas de choque torna-se mais fácil, podendo ser feita a olho nú.

5.3 Determinação da Curva “tensão – tempo” do Isolador

Tal como já foi referido na secção 2.1.3.2, a característica tensão-tempo é uma propriedade muito importante de qualquer dispositivo ou estrutura de isolamento. Em termos práticos, fornece as bases para estabelecer a rigidez do isolamento ao impulso e para o projeto do nível de proteção contra sobretensões, segundo [1]. Na Figura 2.9 está representado um esboço de uma curva tensão-tempo, onde são indicados os dois parâmetros que a caracterizam, a tensão de pico atingida e o tempo que levou até à disrupção. Estes parâmetros são calculados da seguinte forma, considerando uma onda de choque:

1. Desenhar uma linha horizontal a partir do valor da tensão de pico;
2. Desenhar uma linha vertical que cruze o ponto onde ocorreu a disrupção;
3. A interseção das linhas horizontal e vertical resulta num ponto da curva tensão-tempo.

O ensaio para determinar a curva tensão-tempo consiste na aplicação de ondas de choque com um valor de pico cada vez mais elevado, até ao valor máximo do gerador, começando com uma tensão baixa mas suficiente para provocar o contornamento da cadeia de isoladores, segundo [29]. O objetivo deste ensaio é conhecer a curva que relaciona o valor de pico da tensão de disrupção com o tempo até à disrupção, considerando ondas de choque atmosférico.

Nos primeiros ensaios, enquanto a tensão está próxima da tensão de disrupção, a cadeia começa por escorvar na cauda da onda. À medida que as tensões vão sendo mais elevadas a cadeia acaba por escorvar na frente de onda. Isto acontece porque o dV/dt das ondas de choque é cada vez maior na frente de onda, consoante se aumenta o valor da tensão de pico, segundo [29]. Pode começar-se o ensaio com um aumento de 50 % do valor da tensão de disrupção, para garantir que a cadeia escorva, e aumenta-se progressivamente até 90 %, por exemplo. Para cada valor de tensão aplicam-se 3 impulsos à cadeia e registam-se os valores da tensão de disrupção e do tempo de corte. Para construir a curva tensão-tempo define-se a tensão de disrupção e o tempo de corte como a média aritmética dos valores registados.

A tensão de disrupção obtida no ensaio descrito na secção 5.2, correspondente a 135,3 kV, equivale a aproximadamente 210,5 V. Este valor está muito próximo do valor limite de entrada do transformador de ensaio (220 V), pelo que este ensaio não é possível realizar com o presente equipamento do laboratório. No entanto, foram feito dois ensaios, um com

5.3. DETERMINAÇÃO DA CURVA “TENSÃO – TEMPO” DO ISOLADOR

uma tensão muito próxima da tensão de disrupção e o outro com um valor aproximadamente 14 % superior à tensão de disrupção, para permitir a visualização da dependência do valor de pico de uma onda de choque com o seu tempo de corte.

A Figura 5.10 mostra a onda de tensão resultante da aplicação de uma onda choque com um valor de pico próximo da tensão de disrupção.

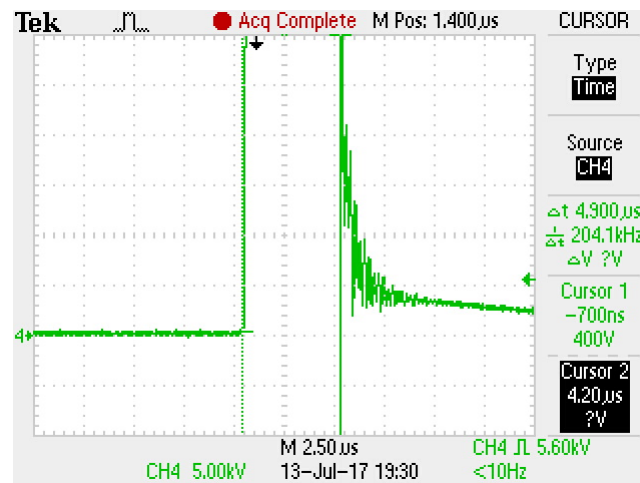


Figura 5.10: Aplicação de uma onda de choque com 137,6 kV

Na Figura 5.11 está representada a onda de choque com um valor de pico 14 % superior ao valor da tensão de disrupção. Apesar do valor de pico aplicado, 154,3 kV, corresponder a cerca de 240 V e este valor ser superior ao valor limite de entrada do transformador de ensaio, como foi realizado apenas um ensaio não resulta em problemas no funcionamento do mesmo.

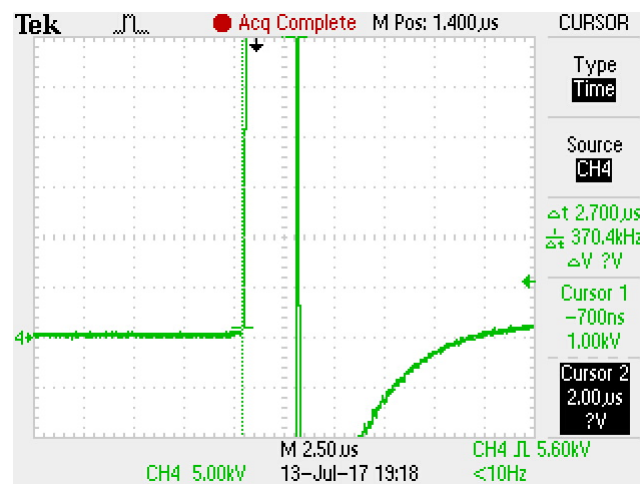


Figura 5.11: Aplicação de uma onda de choque com 154,3 kV

Não é possível, por observação das Figuras 5.10 e 5.11, ver as ondas de choque na totalidade, devido à falta de aparelhagem indicada para o efeito. No entanto, e apesar do valor de Δt indicado não corresponder ao valor do tempo de corte, dá para ter um

noção da diferença entre os tempos de corte, visto que as duas figuras estão na mesma escala temporal. Na Tabela 5.2 estão esquematizados alguns parâmetros dos dois ensaios realizados.

Tabela 5.2: Parâmetros relativos aos dois ensaios realizados para determinação da curva tensão-tempo

	U_1 (V)	U_{pico} (kV)	T_{corte} (μs)
1º Ensaio	214	137,6	4,9
2º Ensaio	240	154,3	2,7

Na Tabela 5.2 é visível a dependência entre o valor máximo de tensão da onda de choque na qual se estabelece a situação de descarga (designado por U_{pico}) e o intervalo de tempo entre o início da onda de choque e o instante em que ocorre a disrupção (designado por T_{corte}). Quanto maior o valor da tensão aplicada, denominada por U_1 , maior será o valor da tensão de pico da onda de choque e conseqüentemente mais facilmente ocorrerá a disrupção, pelo que o tempo de corte será menor. Se não houvesse limitações de tensão no laboratório era possível aplicar ondas de choque com tensão de pico crescente, como descrito no início da presente secção, e confirmar esta dependência através da análise de um maior número de dados.

Inicialmente, os níveis de isolamento⁵ para os descarregadores de sobretensões⁶ eram determinados pela avaliação dos valores da tensão de disrupção U_{50} (BIL⁷) e forneciam um nível de tensão suportável suficiente para que todos os isolamentos suportassem. Com estes valores era possível construir a curva tensão-tempo. Da mesma forma os níveis de proteção fornecidos pelos dispositivos de proteção eram também determinados, segundo [1]. Estas duas características tensão-tempo estão representadas na Figura 5.12, adaptada de [1].

A curva superior (B) representa os níveis básicos de isolamento do equipamento a ser protegido, enquanto que a curva inferior (A) representa o nível da tensão de proteção fornecida pelos equipamentos de proteção, tais como hastes de descarga. A diferença entre as duas curvas, tal como indicado na Figura 5.12, permite obter a margem de segurança para o sistema de isolamento. Então, a relação de proteção, segundo [1], vem:

$$\text{Relação de Proteção} = \frac{\text{Tensão máxima permitida}}{\text{Tensão de choque máxima suportável pelo equipamento}} \quad (5.15)$$

⁵O nível de isolamento é definido pelos valores das tensões de ensaio que o isolamento do equipamento a ensaiar é capaz de suportar.

⁶Dispositivo de proteção de sobrecarga concebido para limitar a duração e amplitude da corrente resultante (IEV 614-03-51).

⁷*Basic lightning impulse insulation Level* - é a rigidez dielétrica do isolamento expressa em termos do valor de pico da onda de choque atmosférico, segundo [30].

5.3. DETERMINAÇÃO DA CURVA “TENSÃO – TEMPO” DO ISOLADOR

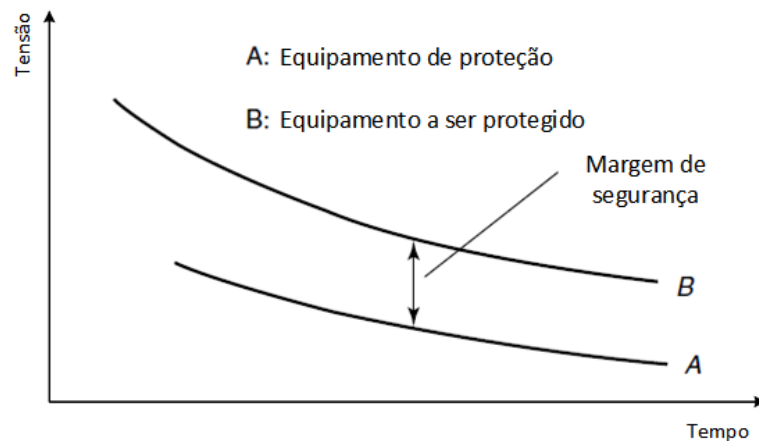


Figura 5.12: Coordenação entre os níveis básicos de isolamento e de proteção

O método convencional para a coordenação de isolamento⁸ assenta em três princípios chave, segundo [31]:

1. De modo a evitar falhas de isolamento, o nível de isolamento de diferentes tipos dos equipamentos ligados ao sistema tem de superior à amplitude das sobretensões transitórias que aparecem no sistema;
2. As amplitudes das sobretensões transitórias são normalmente limitadas ao nível de proteção pelos equipamentos de proteção;
3. Então, o nível de proteção tem de ser inferior ao nível de isolamento por uma margem de segurança. Geralmente, o nível de isolamento é estabelecido entre 15 % a 25 % acima do nível de proteção.

A Figura 5.13, adaptada de [31], esquematiza os princípios descritos acima.

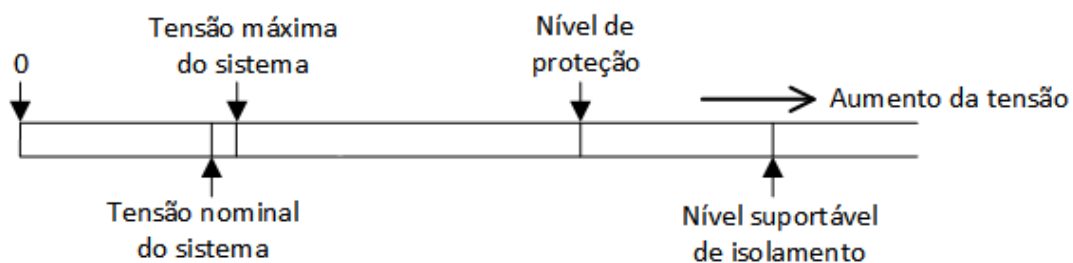


Figura 5.13: Coordenação do isolamento

Na coordenação de isolamento tem de se garantir que os equipamentos do sistema em consideração estão protegidos e que as interrupções não intencionais sejam mínimas. A

⁸Seleção da rigidez dielétrica de um equipamento em relação às tensões que podem surgir no sistema para o qual o equipamento é destinado, (IEV 581-21-04).

característica do intervalo de coordenação que protege o isolamento das linhas pode ser aumentada para reduzir interrupções indesejáveis, segundo [31].

Para tensões mais elevadas, a abordagem simplista usada é inadequada. Além disso, os critérios económicos impõem que a coordenação de isolamento assente numa base mais científica, de acordo com [31].

As práticas nos dias de hoje, em relação à coordenação de isolamento, baseiam-se em métodos estatísticos que relacionam diretamente a rigidez dielétrica⁹ e o esforço elétrico¹⁰, de acordo com [1]. Este método requer um conhecimento da distribuição dos esforços e rigidez dielétrica esperados, segundo [1].

Nestes sistemas de transmissão, com tensões muito elevadas, o tamanho das cadeias de isoladores não aumenta linearmente com a tensão, mas sim com aproximadamente $V^{1,6}$, segundo [31]. Na abordagem estatística, o objetivo não é conhecer o valor máximo da sobretensão, mas sim a distribuição estatística das sobretensões, de acordo com [31].

⁹Quociente da tensão máxima aplicada sem ocorrer disrupção pela distância entre as partes condutoras, conforme as condições de ensaio definidas (IEV 212-11-37). Por outras palavras, pode dizer-se que a rigidez dielétrica mede a qualidade de um material como isolador, segundo [32].

¹⁰*Electrical Stress* - O esforço elétrico a que um material isolante está sujeito é igual à intensidade do campo elétrico, segundo [33]

CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

O facto de este projeto possibilitar pela primeira vez a execução de ensaios impulsivos de alta tensão no laboratório do DEE, o que antes não era praticável, pode ser encarado como um objetivo cumprido, já que com o equipamento montado é possível realizar diferentes ensaios a diversos objetos. Conclui-se assim que o objetivo primordial foi atingido, apesar de terem surgido alguns contratemplos que podiam ter tido um impacto negativo no resultado final do presente trabalho, e que serão explicados posteriormente.

Em primeiro lugar, foi feita uma descrição geral do sistema e as principais normas de segurança a ter em consideração. Por se tratar de um sistema de alta tensão¹, é imperativo seguir as recomendações indicadas. Depois, explicou-se como é feita a alimentação da montagem e o equipamento que faz parte do circuito de ensaio, onde são indicados quais os componentes do *kit* da *Terco* que foram efetivamente usados. Posteriormente, foi dada a conhecer a configuração do sistema de ensaio escolhida para o circuito montado em laboratório e o objeto a ensaiar, no caso um isolador de vidro temperado. No caso do objeto a ensaiar, previa-se o estudo de uma cadeia de isoladores composta por três isoladores. Contudo, não foi possível realizar esse estudo porque a tensão disponibilizada à saída do transformador de ensaio, no seu limite máximo, não era suficiente para fazer escorvar a cadeia.

Após isto, foi abordada a comunicação efetuada com o digitalizador RTD 710A, inicialmente de uma forma geral e como reconhecimento do equipamento e finalmente de uma forma mais aprofundada, através da utilização de comandos específicos e de janelas de interface próprias para a configuração do instrumento. Este equipamento era para ser usado na visualização das formas de onda, algo que não foi possível devido a uma avaria inesperada, em que as formas de onda resultantes do equipamento apresentavam muita

¹As linhas de alta tensão caracterizam-se por ter uma tensão nominal igual ou superior a 60 kV

distorção e não continham qualquer significado em relação às ondas aplicadas.

Então, foi implementado outro sistema de medição, usando um osciloscópio, que dado as limitações de tensão inerentes ao equipamento só foi útil na visualização das formas de onda até um certo valor de tensão. Ainda assim, verificaram-se com sucesso as ondas de choque atmosférico padrão resultantes do circuito de ensaio, visto que os seus valores de frente de onda e de cauda de onda se encontram dentro da gama de valores aceite. Uma vez que a onda gerada está dentro dos padrões para os ensaios em alta tensão, seguiu-se a fase dos ensaios.

O primeiro ensaio realizado teve como objetivo determinar a tensão de contornamento U_{50} do isolador. Esta tensão é determinada através de ensaios onde são aplicadas ondas de choque atmosféricas ao isolador em estudo e onde é medida a tensão que causa a disrupção 50 % das vezes. Para o estudo em causa foi usado o método *Up and Down*, que consiste na aplicação de sucessivos impulsos ao isolador, aumentando ou diminuindo a tensão de impulso em relação ao ensaio anterior, conforme o resultado obtido. Terminado o ensaio concluiu-se que o isolador está conforme, no que diz respeito à tensão suportável a ondas de choque atmosférico, visto que a tensão de disrupção calculada é superior a 1,3 vezes a tensão suportável pelo isolador, performance que permite ter segurança no equipamento quando sujeito a ensaios. Durante os ensaios verificou-se também que não houve em momento algum perfuração do isolador, podendo assim continuar em funcionamento.

O segundo e último ensaio consiste na determinação da característica tensão-tempo do isolador. O ensaio para determinar esta característica consiste na aplicação de ondas de choque com um valor de pico cada vez mais elevado, até ao valor máximo do gerador, começando com uma tensão baixa mas suficiente para provocar o contornamento do isolador. Uma vez que o valor correspondente à tensão de disrupção do isolador já está muito próximo do valor limite do transformador de ensaio, este ensaio não pode ser realizado com o equipamento disponível. Ainda assim, foram efetuados dois ensaios, um com uma tensão muito próxima da tensão de disrupção, e outro com um valor ligeiramente superior à tensão de disrupção, para perceber qual a dependência entre o valor de pico de uma onda de choque com o seu tempo de corte. Chegou-se à conclusão que quanto maior o valor da tensão aplicada maior será o valor da tensão de pico da onda de choque e consequentemente mais facilmente ocorrerá o escorvamento do isolador, pelo que o tempo de corte será menor.

Ainda que tenham ocorrido diversos contratempos que condicionaram a realização da dissertação, o objetivo de montar um sistema de ensaios impulsivos no laboratório de AT presente no DEE foi conseguido, embora com algumas limitações inerentes às condicionantes já mencionadas.

Foi perceptível, ao longo deste projeto, o muito trabalho que ainda pode ser feito no sentido de melhorar as condições do laboratório de alta tensão. Desde logo, a aquisição

de um sistema digital de análise de impulsos permitia um *upgrade* enorme no estudo dos resultados dos ensaios, visto que este sistema engloba a medição e a análise automática das ondas de choque atmosférico. Além de permitir a visualização completa e imediata das formas de onda, ainda calcula automaticamente os tempos de frente e de onda, e no caso de ocorrer o escorvamento do objeto sujeito a ensaios, o tempo de corte. Com um sistema deste género era ainda possível automatizar a aproximação ou afastamento dos elétrodos esféricos do disruptor, mencionados na secção 3.4.

Para além do sistema mencionado, a aquisição de um gerador de *Marx*, um gerador de impulsos com mais de um estágio, permitiria a realização do ensaio para determinação da característica tensão-tempo e permitia também ensaiar cadeias de isoladores com um maior número de isoladores, visto que as tensões aplicadas podiam ser bastante superiores. Com a aquisição desta torre de gerador de impulsos, era necessário adquirir a sua unidade de alimentação, um divisor de tensão mais potente para reduzir a tensão a ser medida e as unidades de comando e análise já referidas. Para incorporar estes elementos no sistema de ensaios seriam necessárias algumas modificações na estrutura do laboratório, desde logo uma maior área com um pé direito de 11 m de altura, no mínimo, para a disposição dos equipamentos.

Com todas estas modificações o laboratório de alta tensão poderia adquirir uma dimensão industrial, permitindo a melhoria da qualidade do ensino e investigação nesta temática e uma maior interação com a indústria, podendo realizar alguns ensaios para a mesma.

BIBLIOGRAFIA

- [1] E. Kuffel, W. S. Zaengl e J. Kuffel. *High Voltage Engineering - Fundamentals*. 2ª ed. Oxford: Butterworth-Heinemann/Newnes, 2000. ISBN: 0 7506 3634 3.
- [2] D. Kind e K. Feser. *High Voltage Test Techniques*. 2ª ed. Oxford: Newnes, 2001. ISBN: 0 7506 5183 0.
- [3] *Dias® 733 - Digital Impulse Analyzing System*. Rel. téc. Haefely Hipotronics, p. 1. URL: <http://www.haefely-hipotronics.com/products/product/dias-r-733/> (acedido em 25/01/2017).
- [4] C. L. Wadhwa. *High Voltage Engineering*. 2ª ed. New Delhi: New Age International, 2007, p. 151. ISBN: 978-81-224-2323-5.
- [5] S. Sunkel. *Introduction to High Voltage Experiments*. Rel. téc. Estocolmo: Terco, 2011, p. 36.
- [6] W. Hauschild e E. Lemke. *High-Voltage Test and Measuring Techniques*. Berlim: Springer-Verlag, 2014. ISBN: 978-3-642-45351-9. DOI: 10.1007/978-3-642-45352-6.
- [7] *HiAS® 743 - High Resolution Impulse Analyzing System*. Rel. téc. Haefely Hipotronics. URL: <http://www.haefely-hipotronics.com/products/product/hias-r-743/> (acedido em 25/01/2017).
- [8] Tektronix. *RTD 710A Digitizer - Instruction Manual*. 1988.
- [9] Tektronix. *RTD 710A Digitizer - Service Volume 1*. 1989.
- [10] Tektronix. *RTD 710A - Instrument Interfacing Guide*. 1988.
- [11] Tektronix. *7612D Programmable Digitizer - Instruction Manual*. Rel. téc. Oregon: Tektronix, Inc., 1982, p. 14.
- [12] *Extending the IEEE 488 Bus*. 2012. URL: <http://www.ni.com/white-paper/3338/en/> (acedido em 26/01/2017).
- [13] Tektronix. *7000 Series Oscilloscope History*. URL: <http://www.tek.com/Masurement/Support/scopes/faq/history.html> (acedido em 26/01/2017).
- [14] HBM. *7600 Isolated Digitizer GEN series - User Manual*. Rel. téc. Darmstadt: HBM, 2010, p. 24.

- [15] V. Neves. *Determinação Experimental de Tensões de Disrupção de Intervalos de Ar*. Rel. téc. FCT/UNL, 2014, pp. 1,2.
- [16] Terco. *HV 9000 High Voltage Modular Training Set*. Rel. téc. Estocolmo: Terco, 2015.
- [17] Terco. *High Voltage Modular Training Set HV 9000*. Rel. téc. Estocolmo: Terco, 2009.
- [18] M. R. de Figueiredo. “Projecto de Linha Aérea de Alta Tensão com Estudo do Comportamento Longitudinal das Cadeias de Isoladores”. Tese de doutoramento. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009.
- [19] G. Tertuliano. *Norma Técnica CELG D - Isoladores de Vidro ou Porcelana*. Rel. téc. CELG Distribuição, 2015.
- [20] N. Instruments. *GPIB-USB-HS (GPIB Instrument Control Device)*. URL: <http://www.ni.com/pt-pt/support/model.gpib-usb-hs.html>.
- [21] L. Fu, H. Fu, Z. Xian-wu e L. jun Song. “The study of VCO Automatic Test System Base on GPIB Bus”. 2010.
- [22] N. Instruments. *GPIB Hardware and Software Specifications*. 2008. URL: <http://www.ni.com/white-paper/3388/en/>.
- [23] Electronics Notes. *What is GPIB / IEEE 488 Bus*. URL: <https://www.electronics-notes.com/articles/test-methods/gpib-ieee-488-bus/what-is-gpib-ieee488.php>.
- [24] N. Instruments. *National Instruments VISA*. 2014. URL: <https://www.ni.com/visa/>.
- [25] C. R. J. Jr, W. A. Sethares e A. G. Klein. “Software Receiver Design: Build Your Own Digital Communication System in Five Easy Steps”. Em: Cambridge University Press, 2011. Cap. Envelope of a Bandpass Signal, p. 417. ISBN: 9781107007529.
- [26] N. Instruments. *Instrument Driver Network*. 2003. URL: http://sine.ni.com/apps/utf8/niid{_}web{_}display.download{_}page?p{_}id{_}guid=E3B19B3E922C659CE034080020E74861.
- [27] V. Neves. *Alta Tensão - Determinação da tensão de escorvamento U50 de uma cadeia de isoladores*. Rel. téc. FCT / UNL, 2013, pp. 1, 2.
- [28] UMEK. *HV glass suspension insulator - U70BS and U70BL type*. Rel. téc. Rússia: UMEK, p. 1.
- [29] V. Neves. *Alta Tensão - Determinação das Curvas "tensão-tempo" do isolador com hastes*. Rel. téc. FCT / UNL, 2013, p. 3.
- [30] A. R. Hileman. “Specyfying the Insulation Strength”. Em: *Insulation Coordination for Power Systems*. Ed. por H. L. Willis. North Carolina: CRC Press, 1999. Cap. 1. ISBN: 978-0-8247-9957-1.
- [31] J. R. Lucas. “Insulation Co-ordination”. Em: *High Voltage Engineering*. Colombo, 2001. Cap. 10.

- [32] I. N. C. Braga. *Rigidez dielétrica de alguns materiais*. 2014. URL: <http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/almanaque/155-rigidez-dieletrica-de-alguns-materiais.htm>.
- [33] M. S. Naidu e V. Kamaraju. “Electric Field Stresses”. Em: *High-Voltage Engineering*. 2ª ed. Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 1996. Cap. 1.1. ISBN: 0-07-462286-2.

